

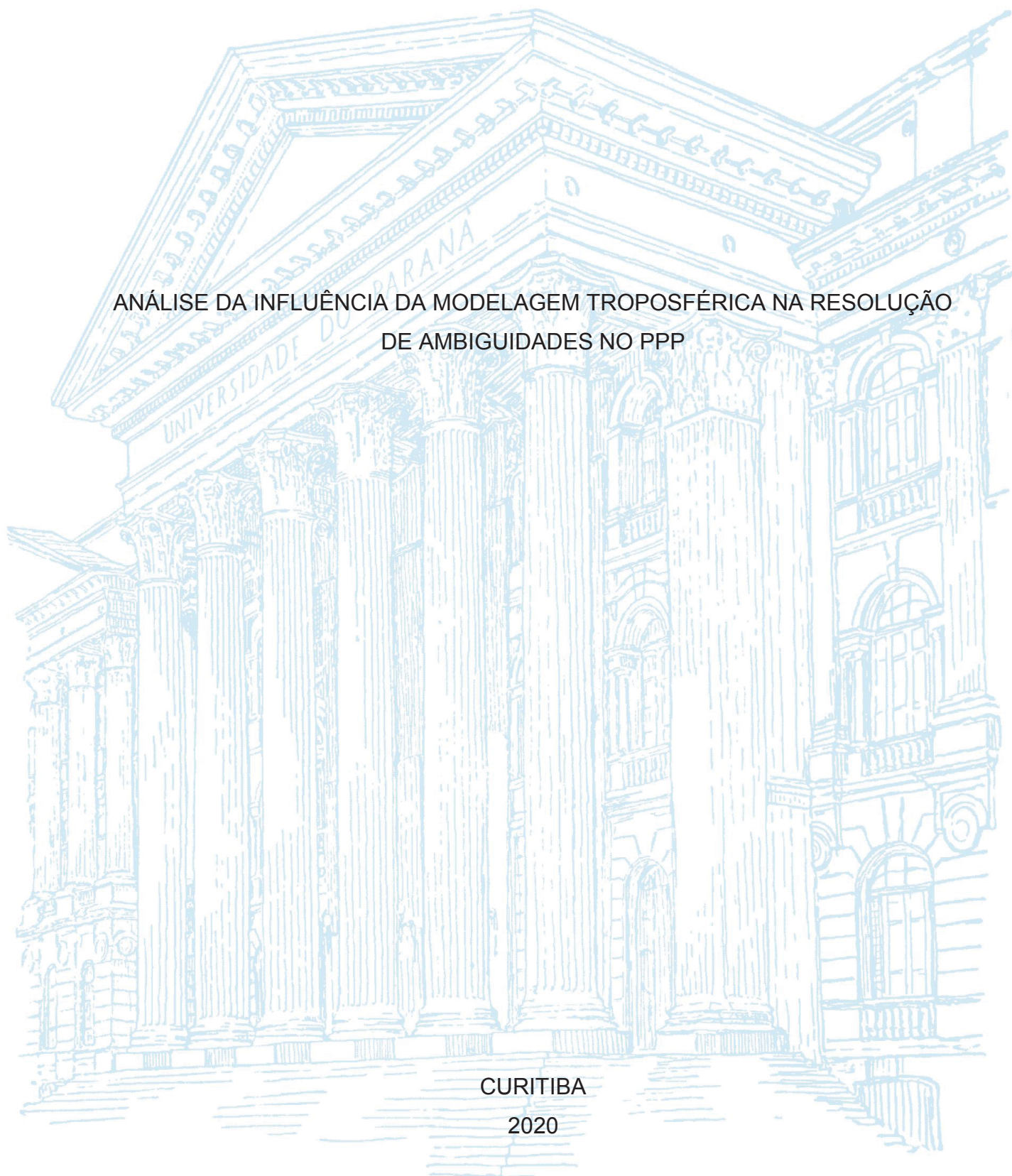
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LAIS THUANY CARDOSO THEODORO

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA MODELAGEM TROPOSFÉRICA NA RESOLUÇÃO
DE AMBIGUIDADES NO PPP

CURITIBA

2020



LAIS THUANY CARDOSO THEODORO

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA MODELAGEM TROPOSFÉRICA NA RESOLUÇÃO
DE AMBIGUIDADES NO PPP

Dissertação apresentada ao curso de Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências Geodésicas.

Orientador: Prof. Dr. Tiago Lima Rodrigues
Coorientador: Prof. Dr. Paulo Sergio de Oliveira Junior

CURITIBA

2020

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

T388a Theodoro, Lais Thuany Cardoso
 Análise da influência da modelagem troposférica na resolução de ambiguidades no PPP
 [recurso eletrônico] Lais Thuany Cardoso Theodoro. – Curitiba, 2020.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, 2020.

Orientador: Tiago Lima Rodrigues.
Coorientador: Paulo Sergio de Oliveira Junior.

1. Sistema de Posicionamento Global. 2. Troposfera. I. Universidade Federal do Paraná. II. Rodrigues, Tiago Lima. III. Oliveira Junior, Paulo Sergio de. IV. Título.

CDD: 526.9

Bibliotecária: Vanusa Maciel CRB- 9/1928



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO CIÊNCIAS
GEODÉSICAS - 40001016002P6

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em CIÊNCIAS GEODÉSICAS da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **LAIS THUANY CARDOSO THEODORO** intitulada: **ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA MODELAGEM TROPOSFÉRICA NA RESOLUÇÃO DE AMBIGUIDADES NO PPP**, sob orientação do Prof. Dr. TIAGO LIMA RODRIGUES, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

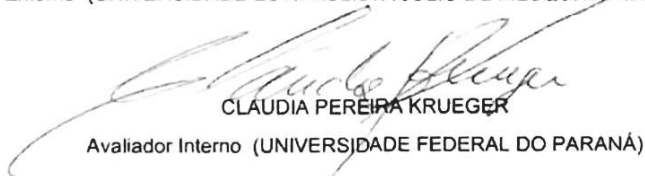
CURITIBA, 28 de Fevereiro de 2020.


TIAGO LIMA RODRIGUES

Presidente da Banca Examinadora (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)


DANIELE BARROCA MARRA ALVES

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE EST. PAULISTA JÚLIO DE MESQUITA FILHO/PR. PRUDENT)


CLAUDIA PEREIRA KRUEGER
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

A Deus,
aos meus pais, Paulo Theodoro e
Angela Maria Cardozo,
aos meus irmãos Thaís, Talys e Paulo Daniel,
a todos os meus amigos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus por ter cuidado de mim ao longo dessa trajetória e por me fazer forte nos momentos necessários para que assim eu pudesse passar pelas adversidades da vida.

Aos meus pais, Angela e Paulo, por todo apoio, carinho e cuidado, por entenderem os momentos em que estive ausente, por estarem sempre ao meu lado e serem o meu porto seguro.

Aos meus irmãos, Thaís, Talys e Daniel, por estarem comigo em todos os momentos. Dividir a vida com vocês me tornou a pessoa que sou hoje, e sou grata a vocês por isso. Obrigada por estarem do meu lado mesmo quando eu não pude estar com vocês, vocês são meu tudo.

Ao meu orientador Prof. Dr. Tiago Lima Rodrigues por todo ensinamento, pela paciência, pela dedicação, por encarar todos os desafios comigo e pela amizade. O senhor tem todo meu respeito e admiração.

Ao meu Co-Orientador Prof. Dr. Paulo Sergio de Oliveira Junior, pela orientação, pela colaboração no desenvolvimento da pesquisa, e pela amizade.

À banca, Prof. Dr(a). Danielle Barroca Marra Alves e Prof. Dr(a). Claudia Pereira Krueger, por terem sido fundamentais no desenvolvimento e aprimoramento da pesquisa, por estarem sempre disponíveis e terem sido tão atenciosas.

Aos meus amigos, em especial Amanda, Elias, Fabiano, Jorge, Marciano, Niedja, Ruy, Samoel, Sérgio e Túlio, por todos os conselhos, pela força nos momentos mais difíceis, pela companhia, acolhimento e pela amizade. Passamos momentos maravilhosos juntos. Vocês são um presente.

Ao meu grande amigo Kauê. Obrigada por encarar os desafios comigo, por todo apoio, por sempre estar ao meu lado. Sempre serei grata a ti.

Aos demais amigos e pessoas que me ajudaram e estiveram ao meu lado.

À UFPR, ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e seu corpo docente, pelo acolhimento, por todos os ensinamentos e por proporcionarem as condições necessárias para o desenvolvimento da pesquisa.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da Universidade Estadual Paulista (UNESP), em especial à Tayná Aparecida Ferreira Gouveia por ter cedido os dados necessários ao desenvolvimento da pesquisa e por todo apoio.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo financiamento desta pesquisa por meio da concessão de bolsa de estudos durante todo o período.

"Se você só fizer o que sabe, nunca será nada além do que já  ."

(Mestre Shifu)

RESUMO

O Posicionamento Por Ponto Preciso (PPP) tem sido amplamente investigado pela comunidade científica e utilizado em diversas aplicações, devido a sua praticidade operacional e baixo custo. Após os efeitos causados pela ionosfera, a principal fonte de erro no sinal do Sistema de Navegação Global por Satélite (GNSS) ocorre ao atravessar as camadas hidrostática e não hidrostática da neutrosfera, as quais geram uma refração e uma curvatura no sinal, principalmente a camada troposférica, que concentra a maior parte desses gases, degradando assim a qualidade do posicionamento. A correta modelagem troposférica está intrinsicamente relacionada à capacidade de resolução das ambiguidades (RA), isto é, ao conhecimento do número inteiro de ciclos entre o satélite e o receptor, o que pode encurtar o tempo de rastreo e aumentar a qualidade do posicionamento. Quando a modelagem troposférica não é realizada adequadamente, o resíduo gerado recai sobre as ambiguidades, dificultando ou até mesmo impossibilitando a RA. O Brasil, por sua grande extensão territorial e distintas características climáticas, apresenta características troposféricas específicas em cada uma de suas regiões. Dessa forma, um mesmo modelo troposférico pode ser adequado para uma região e não ser adequado para outra. Este trabalho tem por objetivo avaliar a influência de modelagens troposféricas na RA no PPP, em diferentes regiões do território brasileiro, nos períodos do verão e do inverno, e detectar se existe um modelo mais adequado para o território brasileiro no caso do PPP com RA. Para isso, utilizou-se o modelo Saastamoinen e a Estimativa do atraso zenital troposférico, além do modelo de Previsão Numérica de Tempo (PNT) do CPTEC/INPE, em conjunto com a função de mapeamento de Niell, para as correções da refração troposférica. Para a definição das localizações das estações da RBMC de estudo (BRAZ, UFPR, RNNA, POVE, SMAR, SAGA) utilizou-se dados de radiossondas e de climatologia, selecionando-se seis estações e quatro intervalos de tempo de rastreo, totalizando 144 experimentos. Os resultados indicaram que o uso do modelo de PNT CPTEC/INPE e da estimativa do ZTD, com e sem a RA, fornecem acurácia de poucos centímetros. Já o uso do modelo Saastamoinen proporcionou acurácia na ordem do decímetro, e não foi suficientemente adequado para a ocorrência da RA, como os demais modelos analisados. Ademais, os melhores resultados da REQM foram obtidos com o uso do modelo de PNT CPTEC/INPE nas estações em que houve a menor variação e menor magnitude da componente não hidrostática, e os resultados dos processamentos no período do inverno foram mais acurados do que no verão, com exceção da estação SMAR, a qual apresentou maior umidade no inverno. Com o uso da estimativa do ZTD não houve padrão ou sinal de correlação com as questões físicas mencionadas, somente resultados melhores no período de inverno. Os resultados demonstraram que diferentes tipos de modelagem da refração troposférica influenciam diretamente na RA, a ponto da mesma não ocorrer ou ocorrer de forma errada, degradar a acurácia do posicionamento e aumentar o tempo de convergência da solução. Além disso, a partir de dados de modelos de PNT regionais pode-se obter resultados promissores, por considerar as reais características atmosféricas da região de estudo, as quais são cruciais na trajetória do sinal percorrido entre o satélite e o receptor.

Palavras-chave: Posicionamento Por Ponto Preciso. Modelagem troposférica. Resolução de ambiguidades. Modelo de Previsão Numérica de Tempo.

ABSTRACT

Precise Point Positioning (PPP) has been widely investigated by the scientific community and used in several applications, due to its operational practicality and low cost. Beyond the effects caused by the ionosphere, the major error source in Global Navigation Satellite System (GNSS) signals arises when it crosses the hydrostatic and non-hydrostatic layers of the "neutrosphere". This interaction, which generates refraction and curvature in the signal, mainly across the tropospheric layer, which concentrates most of those gases, thus degrading the quality of the positioning. Good tropospheric modeling is intrinsically related to the ability to solve ambiguities, i.e., the computation of the entire number of cycles between the satellite and the receiver, which can decrease the tracking time and increase the quality of the positioning. When tropospheric modeling is not performed properly, the resulting residuals generally fall upon ambiguities, making it difficult or even impossible to resolve them. Brazil, due to its large territorial extension and distinct climatic characteristics, has specific tropospheric characteristics in each one of its regions. Thus, a fixed tropospheric model can work well or not. This work aims to evaluate different tropospheric models on its performances at fixing PPP's ambiguities, in different regions of the Brazilian territory, and also in the summer and winter periods. This work is also proposed to detect if there is a more suitable atmospheric model for the Brazilian territory in the case of the PPP with RA. In order to accomplish this, the Saastamoinen model and the estimate of the tropospheric zenith delay were used, and also the CPTEC / INPE "Numerical Weather Forecast" (PNT) model, in conjunction with the Niell mapping function for corrections of tropospheric refraction. As locations of study, we used RBMC stations, radiosonde and climatology data. We selected six RBMC stations (BRAZ, UFPR, RNNA, POVE, SMAR, SAGA) and four tracking time intervals, resulting in a total of 144 experiments. The results indicated that both the CPTEC / INPE PNT model and the ZTD estimate with and without AR provides accuracies of a few centimeters. Whereas the Saastamoinen model yields accuracy in the order of the decimeter, and was not sufficiently satisfactory for the fix of the ambiguities as was in the other analyzed models. Furthermore, the best REQM results were obtained using the PNT model CPTEC / INPE at the seasons with the smallest variation and the lowest magnitude of the non-hydrostatic component, and also the results of the processing of the data of the winter period were more accurate than in with the data of summer period, except for the SMAR station, which presented higher humidity in winter. Using the ZTD estimate, there was no pattern or sign of correlation with the physical issues mentioned, only better results in the winter period. The results demonstrated that different types of tropospheric refraction modeling directly influence RA, degrade the accuracy of positioning and increase the solution's convergence time, and if one uses data from a regional numerical weather forecasting model, it can obtain promising results as the model considers the real atmospheric characteristics of the study region, which are crucial in the trajectory traveled between the satellite and the receiver.

Keywords: Precise Point Positioning. Tropospheric modeling. Ambiguity resolution.

Numerical Weather Forecast Model.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - ILUSTRAÇÃO DO EFEITO DE MULTICAMINHO NO POSICIONAMENTO GNSS	21
FIGURA 2 – ILUSTRAÇÃO PARA INTERPRETAÇÃO GEOMÉTRICA DA AMBIGUIDADE	29
FIGURA 3 – COMPORTAMENTO DO ÍNDICE DE REFRAÇÃO NA IONOSFERA E NA TROPOSFERA	36
FIGURA 4 - ILUSTRAÇÃO DO EFEITO DA ATMOSFERA NEUTRA NOS SINAIS GNSS	38
FIGURA 5: LINHA TEMPORAL DAS FUNÇÕES DE MAPEAMENTO	48
FIGURA 6 – VALORES DA FUNÇÃO DE MAPEAMENTO DAS COMPONENTES HIDROSTÁTICA E NÃO HIDROSTÁTICA DE NIELL EM FUNÇÃO DO ÂNGULO DE ELEVAÇÃO DO SATÉLITE	49
FIGURA 7 - VOLUME DE PRECIPITAÇÃO POR TRIMESTRE AO LONGO DO ANO	59
FIGURA 8 - VARIAÇÃO DE TEMPERATURA (VERÃO E INVERNO).....	60
FIGURA 9 - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL NO BRASIL DOS LOCAIS COM DADOS DE SONDAGENS ATMOSFÉRICAS FEITAS PELO DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS DA UNIVERSIDADE DE WYOMING.	61
FIGURA 10 - LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES DA RBMC UTILIZADAS NOS EXPERIMENTOS.....	62
FIGURA 11 - DADOS DE UMIDADE PROVENIENTES DE RADIOSSONDAS.....	62
FIGURA 12 – PROCEDIMENTOS REALIZADOS NO PROCESSAMENTO GNSS	65
FIGURA 13 – CONFIGURAÇÕES DE PROCESSAMENTO NO RTKLIB v. 2.4.2 PARA O PPP COM RA	69

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 – GRÁFICOS DOS COMPORTAMENTOS DAS UNIDADES RELATIVAS AO LONGO DAS CAMADAS TROPOSFÉRICAS PARA OS DIAS SELECIONADOS, EM CADA UMA DAS REGIÕES DAS ESTAÇÕES RBMC, ÀS 12H UTC.	64
GRÁFICO 2 - RESULTADOS OBTIDOS DE ACURÁCIA COM O MODELO DE SAASTAMOINEM NO VERÃO	72
GRÁFICO 3 - RESULTADOS OBTIDOS DE ACURÁCIA COM O MODELO DE SAASTAMOINEM NO INVERNO.....	74
GRÁFICO 4 - VARIAÇÃO DO ZHD E DO ZWD NO PERÍODO DE 3 HORAS, EM CENTÍMETROS	77
GRÁFICO 5 - VARIAÇÃO DO ZHD E DO ZWD NO PERÍODO DE 1 HORA, EM CENTÍMETROS	78
GRÁFICO 6 - RESULTADOS OBTIDOS DE ACURÁCIA COM O MODELO DE PNT CPTEC/INPE NO VERÃO	79
GRÁFICO 7 - RESULTADOS OBTIDOS DE ACURÁCIA COM O MODELO DE PNT CPTEC/INPE NO INVERNO	83
GRÁFICO 8 - RESULTADOS OBTIDOS DE ACURÁCIA COM A ESTIMATIVA DO ZTD NO VERÃO	87
GRÁFICO 9 - RESULTADOS OBTIDOS DE ACURÁCIA COM A ESTIMATIVA DO ZTD NO INVERNO	90
GRÁFICO 10 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DA REQM COMPONTE PLANIMÉTRICA (VERÃO).....	92
GRÁFICO 11 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DA REQM COMPONTE ALTIMÉTRICA (VERÃO)	93
GRÁFICO 12 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DA REQM COMPONTE PLANIMÉTRICA (INVERNO).....	94
GRÁFICO 13 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DA REQM COMPONTE ALTIMÉTRICA (INVERNO).....	95

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – FONTES E ERROS ENVOLVIDOS NO POSICIONAMENTO GNSS.	12
QUADRO 2 – PRODUTOS DE ÓRBITA E RELÓGIO PRECISOS FORNECIDOS PELA IGS.....	13
QUADRO 3 – COMPARAÇÃO DOS PARÂMETROS DE ENTRADA PARA AS FUNÇÕES DE MAPEAMENTO NIELL, IMF E VMF	55

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - ERRO MÁXIMO DA REFRAÇÃO IONOSFÉRICA NA DIREÇÃO VERTICAL.....	19
TABELA 2 – COEFICIENTES DA FUNÇÃO DE MAPEAMENTO HIDROSTÁTICA .	53
TABELA 3 – COEFICIENTES DA FUNÇÃO DE MAPEAMENTO DA COMPONENTE ÚMIDA	53
TABELA 4 - CARACTERÍSTICAS DAS ESTAÇÕES E DATAS DOS EXPERIMENTOS.....	63
TABELA 5 – PARÂMETROS DE TRANSFORMAÇÃO DO IGB08 (ITRF2008) PARA O SIRGAS 2000	70
TABELA 6 - VALORES DE ZHD E ZWD ÀS 12 E 15 HORAS UTC, PARA OS PERÍODOS DE VERÃO E INVERNO, EM METROS	76
TABELA 7 - TEMPO DE RASTREIO GASTO PARA A OCORRÊNCIA DA INDICATIVA DE RA UTILIZANDO-SE O MODELO DE PNT CPTEC/INPE.....	78
TABELA 8 - TEMPOS DE RASTREIOS GASTOS PARA AS OCORRÊNCIAS DAS INDICATIVAS DE RA UTILIZANDO-SE A ESTIMATIVA DO ZTD.....	85
TABELA 9 - PORCENTAGEM DE MELHORIA ENTRE AS MODELAGENS TROPOSFÉRICAS ANALISADAS	96

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

DD	- Dupla Diferença
DCB	- Tendência Diferencial do Código / <i>Differential Code Bias</i>
ECMWF	- Centro Europeu de Previsões Meteorológicas de Médio Prazo / <i>European Centre for Medium-Range Weather Forecast</i>
FCB	- Tendência de Ciclo Fracionário / <i>Fractional Cycle Biase</i>
GNSS	- Sistema Global de Navegação por Satélite/ <i>Global Navigation Satellite System</i>
IFB	- Tendência entre frequências / <i>Interfrequency bias</i>
IMF	- Função Mapeamento Isobárico / <i>Isobaric Mapping Function</i>
ITRS	Sistema de Referência Terrestre Internacional / <i>International Terrestrial Reference System</i>
MW	- <i>Melbourne-Wübbena</i>
NL	- <i>Narrow Lane</i>
PNT	- Previsão Numérica de Tempo
PPP	- Posicionamento por Ponto Preciso
RA	- Resolução de Ambiguidades
RBMC	- Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS
REQM	- Raiz do Erro Quadrático Médio
SD	- Simples Diferença
SRA	- Sem Resolução de Ambiguidades
TEC	- Conteúdo Total de Elétrons / <i>Total Electron Content</i>
TRA	- Tentativa de Resolução de Ambiguidades
UPD	- Atraso de fase não calibrado / <i>Uncalibrated Phase Delay</i>
VMF	- Função de Mapeamento de Viena
WL	- <i>Wide Lane</i>
WRB	- Tendência do Receptor Wide Lane / <i>Wide Lane Receiver Bias</i>
WRF	- Pesquisa e Previsão Meteorológica / <i>Weather Research and Forecasting</i>
WSB	- Tendência de Satélite Wide Lane / <i>Wide Lane Satellite Bias</i>
ZHD	- Atraso Hidrostático Zenital / <i>Zenital Hidrostatic Delay</i>
ZWD	- Atraso Úmido Zenital / <i>Zenithal Wet Delay</i>
ZTD	- Atraso Troposférico Zenital / <i>Zenith Tropospheric Delay</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 JUSTIFICATIVA	3
1.2 OBJETIVOS	5
1.2.1 Objetivo geral	5
1.2.2 Objetivos específicos.....	5
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	6
2 REVISÃO DE LITERATURA	7
2.1 POSICIONAMENTO POR PONTO PRECISO	7
2.2 EQUAÇÕES DAS OBSERVÁVEIS CÓDIGO E FASE DA PORTADORA E OS ERROS SISTEMÁTICOS NO GNSS	8
2.2.1 Erros sistemáticos no posicionamento GNSS	12
2.2.1.1 Erros relacionados aos satélites GNSS	13
2.2.1.2 Erros relacionados com a propagação do sinal	18
2.2.1.3 Erros relacionados com o receptor e antena	22
2.2.1.4 Erros relacionados com a estação.....	25
2.3 COMBINAÇÕES LINEARES UTILIZADAS NO PPP COM RESOLUÇÃO DE AMBIGUIDADES	27
2.4 MÉTODOS DE RESOLUÇÃO DAS AMBIGUIDADES NO PPP	28
2.4.1 Método baseado na Recuperação dos Relógios da Fase	32
2.5 REFRAÇÃO TROPOSFÉRICA	35
2.5.1 Atraso Troposférico	36
2.5.2 Modelos Troposféricos	41
2.5.2.1 Modelos empíricos.....	41
2.5.2.2 Modelo de PNT CPTEC/INPE	43
2.5.2.3 Estimativa do ZTD	46
2.5.3 FUNÇÕES DE MAPEAMENTO	47
2.5.3.1 Função de mapeamento de Marini	49
2.5.3.2 Função de mapeamento de Chao	50
2.5.3.3 Função de mapeamento de Davis	50
2.5.3.4 Função de mapeamento de Herring	51
2.5.3.5 Função de mapeamento de Niell	51
2.5.3.6 Funções de Mapeamento Baseadas na PNT	54

3 MATERIAL E MÉTODOS	57
3.1 MATERIAIS	57
3.2 ETAPA 1: DEFINIÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO, DOS EXPERIMENTOS E SUAS CARACTERÍSTICAS	58
3.2.1 Áreas de estudo para a realização dos experimentos.....	58
3.2.2 Experimentos	65
3.3 ETAPA 2: UTILIZAÇÃO DO MODELO DE PNT CPTEC/INPE	66
3.4 ETAPA 3: PREPARAÇÃO E PROCESSAMENTO DOS DADOS	67
3.4.1 Procedimentos Realizados.....	67
3.5 ETAPA 4: PROCEDIMENTOS REALIZADOS PARA ANÁLISE DE ACURÁCIA	69
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	71
4.1 RESULTADOS OBTIDOS UTILIZANDO-SE O MODELO SAASTAMOINEN	71
4.2 RESULTADOS OBTIDOS UTILIZANDO-SE O MODELO DE PNT CPTEC/INPE	
75	
4.3 RESULTADOS OBTIDOS UTILIZANDO-SE A ESTIMATIVA DO ZTD	85
4.4 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS.....	91
5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	97
5.1 CONCLUSÕES	97
5.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	100
REFERÊNCIAS.....	102

1 INTRODUÇÃO

O Sistema de Navegação Global por Satélite (GNSS - *Global Navigation Satellite System*) revolucionou a vida do ser humano no que concerne às questões relacionadas ao posicionamento espacial, proporcionando um incremento no conceito que se tinha de localização e refletindo na estrutura do sistema social, econômico e ambiental em que vivemos. Atualmente, diversas pesquisas buscam meios de se obter coordenadas e velocidades cada vez mais acuradas, para as mais diversas aplicações e finalidades (WANG, 2014; LIMA, 2015; DE OLIVEIRA JUNIOR, 2016; GOUVEIA *et al.*, 2017; BRAGA e DAL POZ, 2019; GOUVEIA, 2019).

Com o passar dos anos, diferentes métodos de posicionamento GNSS foram desenvolvidos. Entre os métodos em vigor na atualidade, o Posicionamento por Ponto Preciso (PPP) tem sido amplamente investigado pela comunidade científica. Isso devido à disponibilização de softwares gratuitos e serviços online que possibilitam esse tipo de processamento, e também ao fato de que apenas um receptor é empregado em campo, ao invés de um par como ocorre nos métodos de posicionamento relativo e diferencial (GE, 2008; ALBARICI *et al.*, 2019; BRAGA e DAL POZ, 2019). Além disso, é o método mais indicado para estudos geodinâmicos, meteorológicos, entre outros.

Tais questões podem gerar uma potencial economia de tempo e custos na execução dos levantamentos geodésicos, e torna o PPP um método muito empregado por diversos usuários. Nesse cenário, a comunidade científica busca meios de garantir maior acurácia para esse tipo de posicionamento. Como exemplos de primeiros trabalhos pode-se citar Zumberge *et al.*, (1997) e Kouba e Héroux (2001).

O Posicionamento Por Ponto (PP), o qual baseia-se na observação de medidas do código da onda portadora, fornece acurácia na ordem do metro. Porém, Kouba e Héroux (2001) utilizaram uma abordagem de pós-processamento, incluindo produtos de efemérides finais do IGS e observação da fase da onda portadora de um receptor de dupla frequência, para estimar as coordenadas da estação, além do atraso zenital troposférico e erro do relógio do receptor. Como resultados obtiveram acurácia de posicionamento na ordem do centímetro.

Tradicionalmente, no processamento do PPP não é levada em consideração a questão da resolução de ambiguidades (RA) da fase, isto é, nenhuma tentativa de

estimar valores inteiros de ambiguidade é feita. Nos últimos anos, pesquisas vêm sendo desenvolvidas investigando a questão da RA no PPP e sua influência na qualidade do posicionamento e no tempo de rastreamento em campo. Como exemplo pode-se citar: Blewitt (2006), Laurichesse e Mercier (2007), Collins (2008), Collins e Bisnath (2008), Ge *et al.*, (2008), Laurichesse *et al.*, (2008), Geng *et al.*, (2009), Teunissen *et al.*, (2010), Laurichesse (2011), Shi e Gao (2014), Li *et al.*, (2015), Geng e Shi (2016) e Yi *et al.*, (2016). No Brasil pode-se citar Alves (2010), Lima (2015) e De Oliveira Junior (2017). Dentro desse contexto, a principal questão é levar em conta a influência dos componentes não calibrados do atraso da fase (BLEWITT, 1989) ou *Uncalibrated Phase Delay* (UPD) (GE *et al.*, 2008), b_{Li}^r e b_{Li}^s , do receptor e do satélite, respectivamente.

Este atraso é causado pela passagem do sinal GNSS através dos hardware instalados tanto no satélite quanto no receptor. Uma vez que seus valores não pertencem ao domínio dos inteiros e que eles são fortemente correlacionados com as ambiguidades, surge uma dificuldade na resolução das mesmas. Cabe ressaltar que, no processamento do PPP sem a RA, os UPDs são estimados agrupados com elas. Tal procedimento leva a um maior tempo de rastreamento em campo (SHI e GAO, 2013). Quando se considera a estimativa dos UPDs e a RA, este tempo diminui e há um aumento na acurácia do posicionamento (GE *et al.*, 2008; GENG, 2010). Devido a isso, diversos estudos têm sido realizados e como resultados existem atualmente três distintos métodos para a RA no PPP (seção 2.4), o Método da Dissociação dos Relógios (COLLINS E BISNATH, 2008), o Método da Estimativa dos UPDs (GE *et al.*, 2008) e o Método da Recuperação dos Relógios da Fase (LAURICHESSE *et al.*, 2008), este último sendo utilizado no software RTKLIB v. 2.4.2.

Alves *et al.*, (2011) constataram que, quando ocorre a RA, a qualidade do posicionamento pode melhorar, em alguns casos significativamente, em intervalos de tempo de até uma hora. Com a RA, num intervalo de 30 minutos, os autores obtiveram melhorias, nas componentes norte e vertical, de cerca de 40% em termos da Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM - *Root Mean Square Error*) após a RA. Lima *et al.*, (2016) verificaram que, ao se aplicar o método de RA no PPP estático as melhorias foram de até 80%, para períodos curtos de coleta de dados (poucos minutos), e, no caso cinemático, foram alcançadas melhorias de 60% até 90%.

Além da influência dos UPDs no tempo de convergência da RA e na acurácia do posicionamento, há a influência das camadas da atmosfera terrestre,

ionosfera e atmosfera neutra, as quais geram um avanço e um atraso, respectivamente, no sinal GNSS, quando o mesmo se propaga através das partículas carregadas (elétrons e íons livres) na ionosfera ou Conteúdo Total de Elétrons – TEC, assim como, da quantidade de gases hidrostáticos e vapor d'água presentes na atmosfera neutra. O conteúdo presente nessas camadas causa uma refração nos sinais GNSS (CAMARGO, 1999; TEUNISSEN e MONTENBRUCK, 2017; GOUVEIA, 2019).

Em receptores de dupla frequência pode-se utilizar a combinação Livre de Ionosfera (*ion-free*) para eliminar os efeitos de primeira ordem da ionosfera, os quais representam aproximadamente 99% do atraso ionosférico total (MARQUES *et al.*, 2014). O atraso causado no sinal GNSS pelo efeito da atmosfera neutra pode ser estimado como incógnita no ajustamento ou mitigado, a partir da utilização de modelos troposféricos. Quando essa modelagem não funciona adequadamente, o atraso residual causado pela troposfera pode provocar um erro sistemático que influencie na RA e, conseqüentemente, na precisão e acurácia do posicionamento e no tempo de rastreo (SHI, 2012).

Existem diversas formas de corrigir os efeitos troposféricos, como exemplos citam-se os modelos empíricos, como os modelos Hopfield (HOPFIELD, 1969) e Saastamoinen (SAASTAMOINEN, 1973); a estimativa do atraso troposférico, a qual modela a componente hidrostática e estima a componente úmida do atraso troposférico total; e os modelos regionais de PNT, como o modelo de PNT do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Essas diferentes modelagens possuem distintas características e formulações matemáticas. Dessa forma, tem-se a proposta deste trabalho que é verificar a influência da modelagem troposférica na RA do PPP, detectando se existe um método mais adequado para o território brasileiro.

1.1 JUSTIFICATIVA

As aplicações do PPP são diversas e vão muito além de fornecer posição instantânea e velocidade de um ponto (GE *et al.*, 2008; MONICO, 2008 e LI *et al.*, 2015). Como exemplos, têm-se os estudos de monitoramento de deformação da crosta terrestre (CHAVES, 2001), GNSS-meteorologia (GOUVEIA, 2019), determinação de campo de velocidades (PEREZ *et al.*, 2003), agricultura de

precisão (SANTOS *et al.*, 2017) e determinação de órbitas de satélites (CARARO *et al.*, 2010).

Além disso, no Brasil, a terceira edição da Norma Técnica para Georreferenciamento de Imóveis Rurais (NTGIR) indicou o uso do PPP na estimativa de coordenadas de vértices de apoio ou de referência (estação base), para fins de levantamentos relativos dos vértices que definem o imóvel rural a ser georreferenciado (INCRA, 2013). Ademais, há uma maior praticidade no uso do PPP, visto que se necessita de apenas um receptor em campo e, atualmente, há diversos aplicativos gratuitos, científicos ou não, para processamento PPP, no formato on-line ou off-line.

No entanto, um fator que pode melhorar os resultados nesse tipo de posicionamento é a questão da RA da fase. Segundo Shi (2012) e Yi *et al.*, (2016), o PPP tradicional leva muito tempo para alcançar seu potencial de acurácia, pois não considera a questão da RA, a qual é fundamental para alcançar posições de alta acurácia, e encurtar o tempo de convergência do PPP.

Marques *et al.*, (2014) investigaram o PPP em tempo real, nos modos estático e cinemático, utilizando estimativas das correções de relógios dos satélites, e verificaram que o período de convergência do ajustamento dos dados, em ambos os modos, estático e cinemático, foi de aproximadamente duas horas de rastreo. No modo estático, a acurácia resultante da componente planialtimétrica (3D) atingiu a ordem de aproximadamente 10 cm, com uma hora de dados processados, e, aproximadamente, 3 cm após 2 a 3 horas. No PPP cinemático, após o período de convergência, o valor da REQM para a componente 3D foi de, aproximadamente, 8 cm, em média, para as estações analisadas.

Atualmente, no software RTKLIB v. 2.4.2 tem-se a opção de processamento PPP com RA em caráter experimental, baseado no método de recuperação dos relógios (LAURICHESSE *et al.*, 2008; RTKLIB, 2013), o qual será abordado na seção 2.4.1. Uma vantagem da aplicação desse método é que ele não utiliza observáveis diferenciadas, como no método de eliminação dos UPDs. Isto significa que o usuário não necessita dispor diretamente de observáveis de uma rede de referência em seu entorno no momento do processamento.

Além disso, do usuário são requeridos apenas os produtos de correção do relógio do satélite (arquivos de extensão .clk com soluções .grg), com valores de correção da combinação *Wide-Lane* (seção 2.3). Esses produtos são utilizados no

processo matemático para preservar a natureza inteira das ambiguidades (LAURICHESSE, 2011), e são disponibilizados de forma gratuita pelo centro de análises do Centro Nacional de Estudos Espaciais (CNES – *Centre National D'études Spatiales*).

Cabe ressaltar que o software RTKLIB v. 2.4.2 também é disponibilizado gratuitamente e apresenta uma interface gráfica simples e unificada, o que o torna amigável aos usuários. Adicionalmente, o mesmo apresenta diferentes opções para a correção do atraso troposférico. Cada uma delas, com suas características e sua formulação matemática, fornece um posicionamento cuja acurácia depende da eficácia na modelagem do efeito real.

O Brasil, por sua grande extensão territorial e diferentes características climáticas, apresenta características troposféricas específicas em cada uma de suas regiões. Dessa forma, um mesmo modelo troposférico pode fornecer resultados distintos para diferentes regiões. Tendo em vista as questões levantadas e a ausência de estudos que indiquem qual modelo troposférico, na RA em caráter experimental desse software, fornece os resultados mais acurados nas diferentes regiões do território brasileiro, uma análise dessa questão é relevante tanto para a literatura quanto para os usuários que almejam um posicionamento de maior qualidade ao usarem o PPP.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Verificar a influência do uso de diferentes tipos de correções do atraso troposférico na RA no PPP, abrangendo experimentos sujeitos às distintas condições da troposfera e com diferentes intervalos de tempo de rastreo.

1.2.2 Objetivos específicos

- Adicionar ao código-fonte do software RTKLIB v. 2.4.2 um modelo de correção troposférica, baseado em dados do modelo de PNT CPTEC/INPE e da função de mapeamento de Niell;

- Utilizar dados de radiossondas e de climatologia a fim de selecionar os locais mais adequados para a realização dos experimentos;
- Processar os dados no software RTKLIB v. 2.4.2, sem e com tentativa de RA, utilizando para a mitigação da refração troposférica o modelo Saastamoinen, a estimativa do Atraso Zenital Troposférico (ZTD - *Zenith Tropospheric Delay*) e o modelo de PNT CPTEC/INPE (adicionado ao software), com experimentos em diferentes regiões e intervalos de tempo de rastreo; e
- Analisar a influência e a qualidade da RA, a partir da análise da precisão e acurácia planialtimétrica, para cada uma das formas de mitigação do atraso troposférico realizadas.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está dividido em cinco capítulos. No primeiro capítulo é apresentada uma introdução contendo as considerações iniciais, a justificativa à realização da pesquisa proposta, e os objetivos desta pesquisa. Assim como o tópico referente à estruturação do trabalho.

No segundo capítulo é abordada uma revisão sobre os conceitos relacionados ao desenvolvimento desta pesquisa. São apresentados o método de Posicionamento por Ponto Preciso (PPP), as equações das observáveis código e fase da onda portadora, os erros sistemáticos no posicionamento GNSS, os métodos de RA e os efeitos atmosféricos (ionosfera e troposfera) nos sinais GNSS.

No terceiro capítulo são apresentados os materiais e métodos aplicados na pesquisa, contendo quatro etapas. Estas abrangem o desenvolvimento da rotina do modelo de PNT CPTEC/INPE e da sub-rotina da função de mapeamento de Niell, as características dos experimentos, os dados que serão utilizados no estudo e os procedimentos realizados.

No quarto capítulo são expostos os resultados dos experimentos e suas respectivas análises.

Por fim, o último capítulo (5) é composto pelas conclusões e recomendações dessa pesquisa.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 POSICIONAMENTO POR PONTO PRECISO

Em termos de métodos de posicionamento geodésico pelo GNSS, o método de posicionamento relativo tem sido o mais utilizado. Esse método permite a realização de diferenciações de observações entre diferentes receptores e satélites, o que facilita a minimização e/ou cancelamento matemático dos diversos erros envolvidos com os sinais GNSS, alcançando nível de acurácia na ordem do milímetro (GEORGIADOU e KLEUSBERG, 1988; SEEBER, 2003; ALVES, 2010).

Os fatores que limitam as aplicações nos métodos relativo e diferencial são o custo com o estabelecimento e a manutenção de redes de controle geodésicas, a necessidade de ocupação simultânea das estações e o fato de a acurácia do posicionamento ficar restrita à linha de base (EBNER e FEATHERSTONE, 2008). Para superar essa questão, surgiu o conceito do PPP. Esse método é o tipo de PP no qual as observáveis pseudodistância e fase da onda portadora são empregadas em conjunto com informações precisas sobre a órbita e relógios de satélites, além de efeitos atmosféricos (troposfera e ionosfera) (ZUMBERGE *et al.*, 1997) e erros advindos de várias fontes (seção 2.2.1). Além disso, tem-se o processo de ajustamento sequencial conectando observações e parâmetros ao longo das épocas, o que propõe um aumento da precisão (diminuição do desvio-padrão) dos parâmetros com o passar do tempo (aumento de épocas conectadas).

O conceito do PPP tornou-se possível com desenvolvimentos importantes como o advento de informações precisas de órbitas e relógios de satélites GNSS, e a tecnologia de construção de modelos com observações de fase da onda portadora a partir de receptores de dupla frequência mais avançados (SHEN, 2002).

No PPP pode-se empregar dados de multi-frequência. No caso da constelação GPS tem-se, além das frequências L1 e L2, a nova frequência L5. Essa frequência é o terceiro sinal de GPS civil. Possui maior potência, maior largura de banda e um design de sinal avançado (GPS, 2019b). Ela possui frequência de 1176,45 MHz, e será posicionada dentro do domínio espectral do Serviço de Rádio Navegação da Aeronáutica (ARNSs - *Aeronautical RadioNavigation Services*). Mais informações podem ser obtidas em Monico (2018).

Para dados de dupla frequência, as observáveis fruto da combinação linear de frequências denominada *ion-free* (IF) são frequentemente empregadas nos processamentos, principalmente porque os efeitos ionosféricos de primeira ordem são cancelados matematicamente (DE OLIVEIRA JUNIOR, 2017; SHEN, 2002). No software RTKLIB emprega-se as observáveis L1 e L2 GPS e/ou GLONASS para realizar a *ion-free*.

Geralmente, com o método tradicional do PPP, são necessários aproximadamente 30 minutos para que uma solução de posição possa ser alcançada em um nível de acurácia da ordem do decímetro, em um processamento estático (ALVES *et al.*, 2011; WANG, 2014; IBGE, 2017). No modo cinemático do PPP, Gouveia *et al.*, (2017) constataram que, quando a RA não é considerada, com uma hora de rastreo o usuário consegue obter, em média, uma acurácia planialtimétrica de 45 cm, de acordo com a região. O PPP requer a modelagem dos erros no posicionamento GNSS com uma acurácia correspondente à acurácia desejada (WÜBBENA *et al.*, 2005).

2.2 EQUAÇÕES DAS OBSERVÁVEIS CÓDIGO E FASE DA PORTADORA E OS ERROS SISTEMÁTICOS NO GNSS

O posicionamento GNSS é realizado a partir da medição de quatro observáveis: pseudodistância, fase da onda portadora, efeito Doppler e Razão Sinal/Ruído. Porém, as mais utilizadas em processamentos para posicionamento geodésico são as duas primeiras mencionadas. As medidas de distância entre o satélite e o receptor são baseadas na diferença entre o código gerado no satélite e sua réplica gerada no receptor. A comparação entre esses códigos é feita no receptor através de uma técnica, como a técnica de correlação cruzada, para comparar ambos os códigos. Percorrendo-se o caminho entre o satélite e o receptor, há um retardo entre o código gerado no satélite e aquele gerado no receptor. Esse retardo é o tempo de propagação do sinal (Δt) nesse trajeto (MONICO, 2008; TEUNISSEN e MONTENBRUCK, 2017).

A distância entre o satélite e o receptor é o produto de (Δt) pelo módulo da velocidade da luz no vácuo (c). No entanto, há um não sincronismo entre o Sistema de Tempo adotado como referência, particular de cada sistema de posicionamento (Sistema de Tempo GPS, Sistema de Tempo GLONASS, etc) com o Sistema de

Tempo do relógio contido no receptor do usuário e com os Sistemas de Tempo definidos em cada satélite com seu relógio atômico embarcado. No caso do GPS, tem-se o Sistema de Tempo GPS. Como as medidas de distância são calculadas com essa falta de sincronia e com outros erros sistemáticos envolvidos, as distâncias são denominadas pseudo-distâncias. Dessa forma, os Sistemas de Tempo do satélite (t^s) e do receptor(t^r), aos quais os sinais gerados e transmitidos são referenciados, são relacionados com o Tempo do Sistema em questão (GPS, GLONASS ou Galileo), subtraindo-se um erro nos relógios dos satélites (dt^s) e no relógio do receptor (dt^r), ($t_{GNSS}^s = t^s - dt^s$ e $t_{GNSS}^r = t^r - dt^r$), respectivamente (MONICO, 2008; SEEBER, 2003; TEUNISSEN e MONTENBRUCK, 2017).

Além disso, como o sinal não se propaga no vácuo, devido aos efeitos de refração atmosférica gerados nos sinais GNSS pelo conteúdo das camadas ionosfera e atmosfera neutra, e considerando também o efeito do multicaminho, do erro de órbita, e demais erros (seção 2.2.1), a pseudodistância afasta-se ainda mais da distância geométrica (ρ), referente à distância euclidiana entre o satélite e o receptor (MONICO, 2008).

A observável de diferença de fase da onda portadora é cem vezes mais precisa do que a pseudodistância (SEEBER, 2003). Ela equivale à diferença entre a fase da onda portadora do satélite, recebida no receptor, e a gerada no receptor, ambas no instante de recepção do sinal. A fase da onda portadora é medida em ciclos. O receptor mede a parte fracional da portadora, pela frequência de batimento, e conta o número de ciclos que entram a partir daí, o que resulta em uma medida contínua.

Neste estudo, as observações de pseudodistância P (Equação (1)) e de fase L (Equação (2)) na frequência i são descritas de maneira simplificada como (SHI e GAO, 2014):

$$P_i = \rho + c(dt^r - dt^s) + T_r^s + \frac{f_1^2}{f_i^2} I_i + b_{Pi}^r - b_{Pi}^s + \varepsilon_{Pi}, \quad (1)$$

$$L_i = \rho + c(dt^r - dt^s) + T_r^s - \frac{f_1^2}{f_i^2} I_i - \lambda_i N_i + b_{Li}^r - b_{Li}^s + \varepsilon_{Li}, \quad (2)$$

onde o índice i equivale as frequências das portadoras; ρ é a distância geométrica em função das coordenadas da antena do satélite e do receptor, no instante de transmissão e recepção do sinal. Incluindo os efeitos relativísticos e efeitos atmosféricos; dt^r é o erro do relógio do receptor, no instante t^r , em relação ao

tempo GNSS; dt^s é o erro do relógio do satélite, no instante t^s , em relação ao tempo GNSS; T_r^s é o atraso troposférico; I é o atraso ionosférico na frequência L_i ; λ_i é o comprimento de onda da frequência L_i ; N_i é a ambiguidade inteira da frequência L_i ; b_{Pi}^r e b_{Pi}^s são os atrasos não calibrados dos códigos (UCD – do inglês *Uncalibrated Code Delay*) do receptor e do satélite, respectivamente, para uma dada portadora; b_{Li}^r e b_{Li}^s são os atrasos não calibrados das fases (UPD – do inglês *Uncalibrated Phase Delay*) do receptor e do satélite, respectivamente, também para uma dada portadora; e ε_{Pi} e ε_{Li} representam o efeito do multicaminho e do ruído na frequência L_i no código e na fase, respectivamente. Os termos b são frequentemente referidos como tendências (*biases*), em vez da designação atrasos de hardware ou atrasos não calibrados. Estes serão explicados mais a frente nas seções 2.2.1.1 e 2.2.1.3.

Além dos termos citados nas Equações (1) e (2) de observáveis do PPP, o mesmo também considera os erros sistemáticos devido a efeitos geodinâmicos, como a maré terrestre, o movimento do Polo, a carga oceânica e a carga atmosférica. Além dos Erros devido à variação da posição do centro de fase da antena do satélite e do receptor e do erro devido à fase *Wind-up* ou *Wrap-up*. Esses termos foram omitidos a fim de simplificar as equações, porém, os mesmos são abordados no tópico 2.2.1.

As combinações lineares (CL) das observáveis originais podem ser construídas com algum propósito de eliminação ou minimização de erros sistemáticos. De uma forma geral, elas são dadas por (SHI e GAO, 2014):

$$P_{CL} = \alpha P_i + \beta P_j \quad \text{e} \quad L_{CL} = \alpha L_i + \beta L_j, \quad (3)$$

sendo i e j os índices de frequência; α e β os coeficientes de combinação. Com o objetivo de cancelar os efeitos de primeira ordem da refração ionosférica, utiliza-se as combinações IF das funções de código (Equação (4)) e fase (Equação (5)), usando-se $\alpha_{IF} = f_i^2 / (f_i^2 - f_j^2)$ e $\beta_{IF} = -f_j^2 / (f_i^2 - f_j^2)$. Mais detalhes sobre a dedução desta combinação linear podem ser vistos em Shi e Gao (2014).

$$P_{IF} = \alpha_{IF} P_i + \beta_{IF} P_j = \rho + (cdt^r + b_{Pi}^r) - (cdt^s + b_{Pi}^s) + T_r^s + \varepsilon_{P_{IF}}, \quad (4)$$

$$L_{IF} = \alpha_{IF} L_i + \beta_{IF} L_j = \rho + (cdt^r + b_{Li}^r) - (cdt^s + b_{Li}^s) + T_r^s - \lambda_{IF} N_{IF} + \varepsilon_{L_{IF}}, \quad (5)$$

em que:

$$\begin{aligned}
cdtr_{P_{IF}}^r &= cdt^r + b_{P_{IF}}^r, \\
cdtr_{P_{IF}}^s &= cdt^s + b_{P_{IF}}^s, \\
cdtr_{L_{IF}}^r &= cdt^r + b_{L_{IF}}^r, \\
cdtr_{L_{IF}}^s &= cdt^s + b_{L_{IF}}^s, \\
b_{P_{IF}}^r &= \alpha_{IF} b_{P_i}^r + \beta_{IF} b_{P_j}^r, \\
b_{P_{IF}}^s &= \alpha_{IF} b_{P_i}^s + \beta_{IF} b_{P_j}^s, \\
b_{L_{IF}}^r &= \alpha_{IF} b_{L_i}^r + \beta_{IF} b_{L_j}^r, \\
b_{L_{IF}}^s &= \alpha_{IF} b_{L_i}^s + \beta_{IF} b_{L_j}^s, \\
\lambda_{IF} &= \frac{2cf_0}{(f_1^2 - f_2^2)},
\end{aligned} \tag{6}$$

sendo λ_{IF} o comprimento de onda da combinação IF; N_{IF} a ambiguidade livre de ionosfera, pertencente ao domínio dos reais.

Dessa forma, o modelo tradicional de PPP utiliza as seguintes equações (SHI e GAO, 2014):

$$P_{IF} = \rho + cdt_{P_{IF}}^r - cdt_{P_{IF}}^s + T_r^s + \varepsilon_{P_{IF}}, \tag{7}$$

$$\begin{aligned}
L_{IF} = \rho + cdt_{L_{IF}}^r - cdt_{L_{IF}}^s + T_r^s - \lambda_{IF} N_{IF} + (b_{L_{IF}}^r - b_{P_{IF}}^r) - (b_{L_{IF}}^s - b_{P_{IF}}^s) \\
+ \varepsilon_{L_{IF}}.
\end{aligned} \tag{8}$$

Se o relógio do código do satélite $cdt_{P_{IF}}^s$ for aplicado à observação de fase e o relógio do código do receptor $cdt_{P_{IF}}^r$ for estimado junto com a troposfera e os parâmetros de ambiguidade, então o parâmetro de ambiguidade estimado $-\lambda_{IF} N_{IF} + (b_{L_{IF}}^r - b_{P_{IF}}^r) - (b_{L_{IF}}^s - b_{P_{IF}}^s) + \varepsilon_{L_{IF}}$ é uma função linear da ambiguidade dos inteiros e das tendências de código e fase do receptor e do satélite. Portanto, o parâmetro estimado de ambiguidade será real (SHI e GAO, 2014).

Considerando que a antena do receptor do usuário receba sinais de n satélites, o número de observações é $2n$ (Equações (7) e (8)). O número de parâmetros desconhecidos é 3 coordenadas do receptor, um $cdt_{P_{IF}}^r$, o atraso da troposfera (exceto no caso de modelos empíricos), e n ambiguidades livres de ionosfera. Sendo assim, o grau de liberdade é $(2n - 3 + 1 + 1 + n)$, isto é, são necessários no mínimo cinco satélites usando o modelo de PPP tradicional (SHI e GAO, 2014).

2.2.1 Erros sistemáticos no posicionamento GNSS

O sinal GNSS é transmitido de satélites a aproximadamente 20 mil quilômetros de distância do receptor, estando sujeito a erros aleatórios, sistemáticos e grosseiros. Nessa trajetória, ele é submetido ao efeito Sagnac e ao efeito da Relatividade Geral. Quando passa pelas camadas da atmosfera terrestre, o sinal sofre atrasos ou avanços. Na medida de distância entre o satélite e o receptor, a órbita e o relógio do satélite são tidos como quantidades fixas e sem erros nos ajustamentos. Portanto, a órbita e o relógio precisos são essenciais para garantir a precisão do posicionamento. Quando o receptor GNSS é tido como estático no terreno, os deslocamentos do local, incluindo maré terrestre, maré oceânica e movimento do Polo, etc., devem ser considerados para garantir a qualidade do posicionamento. Além disso, o sinal GNSS transmitido pelos satélites é uma onda eletromagnética circularmente polarizada à direita, dessa forma, as correções do centro de fase das antenas de satélites e do receptor têm de ser consideradas (WANG, 2014).

Como não há a possibilidade de formar as duplas ou triplas diferenças de observáveis no PPP para minimizar certas fontes de erros, os mesmos precisam ser modelados adequadamente. Caso contrário, é impossível alcançar acurácia de posicionamento na ordem do centímetro no PPP (WANG, 2014). A fim de se obter resultados confiáveis, esses modelos matemáticos devem ser válidos para a realidade física que se tenta descrever e capazes de detectar problemas (LIMA, 2015). No QUADRO 1 são apresentadas as fontes e os principais erros envolvidos no posicionamento GNSS.

QUADRO 1 – FONTES E ERROS ENVOLVIDOS NO POSICIONAMENTO GNSS

Fontes	Erros
Satélites	Erro da órbita Erro do relógio Atraso entre duas portadoras no hardware do satélite Centro de fase da antena do satélite <i>Fase Windup</i>

Continua

Conclusão

Fontes	Erros
Propagação do sinal	Refração ionosférica Refração troposférica Perdas de ciclos Multicaminho Rotação da Terra
Receptor / Antena	Erro do relógio Centro de fase da antena do receptor Atraso entre as duas portadoras no hardware do receptor <i>Fase Windup</i>
Estação	Multicaminho ou sinais refletidos Marés terrestres Carga de marés oceânicas Movimento do Pólo Pressão atmosférica

FONTE: Monico (2008).

2.2.1.1 Erros relacionados aos satélites GNSS

- **Erro da órbita**

Os dados de posições e erros dos relógios dos satélites, necessários para o cálculo do posicionamento, podem ser obtidos a partir dos arquivos de efemérides, sendo essas ditas transmitidas, quando disponibilizadas na mensagem de navegação dos satélites; ou precisas, quando são pós-processadas. Os dados de efemérides precisas são mais acurados que os dados presentes nas efemérides transmitidas. O IGS fornece diferentes tipos de efemérides precisas e erros de relógio com diferentes latências e diferentes níveis de precisão (QUADRO 2).

QUADRO 2 – PRODUTOS DE ÓRBITA E RELÓGIO PRECISOS FORNECIDOS PELA IGS

Efemérides GPS		Acurácia	Latência	Atualizações	Intervalo de Dados
Transmitidas	Órbitas	~100 cm	Tempo Real	--	Diariamente
	Rel. Sat	~5 ns RMS			
		~2.5 ns SDev			

Continua

Conclusão

Efemérides GPS		Acurácia	Latência	Atualizações	Intervalo de Dados
Ultra-Rápidas (preditas)	Órbitas	~5 cm	Tempo Real	às 03, 09, 15, 21 UTC	15 min
	Rel. Sat	~3 ns RMS			
		~1,5 ns SDev			
Ultra-Rápidas (observadas)	Órbitas	~3 cm	3 - 9 horas	às 03, 09, 15, 21 UTC	15 min
	Rel. Sat	~150 ps RMS			
		~50 ps SDev			
Rápidas	Órbitas	~2,5 cm	17 - 41 horas	às 17 UTC diariamente	15 min
	Rel. Sat. e estação	~75 ps RMS			5 min
		~25 ps SDev			
Finais	Órbitas	~2,5 cm	12 - 18 dias	Toda quinta-feira	15 min
	Rel. Sat. e estação	~75 ps RMS			Sat.: 30s
		~20 ps SDev			estação: 5 min
Efemérides GLONASS					
Finais		~3 cm	12 - 18 dias	Toda quinta-feira	15 min

FONTE: IGS (2019).

No QUADRO 2, os valores de RMS (*Root Mean Square*) são os erros médios quadráticos dos satélites e das estações IGS, em relação às três componentes geocêntricas XYZ. Os valores de SDev são os desvios padrão dos relógios dos satélites e das estações IGS, expressos em relação à escala de tempo do IGS, que é linearmente alinhada ao Sistema de Tempo GPS em segmentos de um dia (IGS, 2019). O Tempo Universal Coordenado (UTC – do inglês *Coordinated Universal Time*) é um Sistema de Tempo Uniforme, como o Tempo atômico Internacional (TAI), mas constantemente corrigido para acompanhar a rotação da Terra, sendo utilizado mundialmente para atividades científicas.

As efemérides transmitidas são enviadas em tempo real aos usuários junto com os sinais. Porém, a precisão dos dados de posição e erro de relógio do satélite

não atende ao requisito de precisão para o PPP. Embora a órbita ultra-rápida predita esteja disponível em tempo real, com RMS de 5 cm, o relógio de satélite fornecido tem uma precisão muito baixa (1,5 ns, ~ 45 cm) e um longo intervalo de amostragem de 15 minutos, o que restringe sua aplicação para PPP em tempo real (WANG, 2014). Sendo necessária a utilização de produtos de alta precisão de correções da órbita e relógio dos satélites, em tempo real (IGS, 2016b; MARQUES *et al.*, 2014).

As posições dos satélites nas épocas de observações são calculadas por interpolação a partir dos dados contidos nas efemérides precisas. No processo de ajustamento estas posições calculadas são injuncionadas como valores fixos e sem (injunção absoluta). Desta forma, erros na posição dos satélites se propagarão para a posição do usuário. No posicionamento relativo, essa propagação de erros para o receptor usuário é praticamente eliminada, estando sujeita ao comprimento da linha de base (SEEBER, 2003). Já no posicionamento absoluto, ela se dá quase que diretamente, como é o caso do PPP (WELLS *et al.*, 1986).

As efemérides transmitidas para calcular as coordenadas dos satélites apresentam acurácias em torno de 1 a 3 metros. No PPP, o qual utiliza as efemérides precisas, essa acurácia varia de 2 a 5 cm (HOFMANN-WELLENHOF *et al.*, 2008).

- **Erro do relógio**

Os satélites GNSS têm a bordo relógios atômicos altamente precisos e com estabilidade diretamente ligada ao elemento do qual são constituídos. Sendo o Quartzo da ordem de 10^{-9} à 10^{-13} segundos por dia, Rubídio 10^{-13} , Césio $1,5 \cdot 10^{-14}$, chegando ao Maser de Hidrogênio com estabilidade de 10^{-15} por dia. Esses relógios não acompanham o sistema de tempo de referência dos sistemas de navegação por satélite como GPS, GLONASS e Galileo (MARQUES, 2012). Os relógios dos satélites são monitorados pelo segmento de controle. Na mensagem de navegação tem-se o valor pelo qual eles diferem do tempo GNSS, dado na forma de coeficientes de um polinômio de segundo grau que, de acordo com Monico (2008), é expresso pela Equação (9):

$$dt^s(t) = a_0 + a_1(t_{SV} - t_{oc}) + a_2(t_{SV} - t_{oc})^2 + \Delta t_R, \quad (9)$$

onde $dt^s(t)$ é o erro do relógio no instante t da escala de tempo GNSS; t_{SV} é o instante de referência do satélite; t_{oc} é o instante de referência do relógio (*clock*); a_0

é o estado do relógio no instante de referência; a_1 é a marcha linear do relógio; a_2 é a variação da marcha do relógio; e $\Delta t_R = -2\vec{r} \cdot \vec{v}/c^2$ é uma pequena correção devido aos efeitos relativísticos no relógio. Sendo Δt_R o produto escalar dos vetores \vec{r} (posição) e \vec{v} (velocidade) do satélite, respectivamente.

Quando um satélite alcança a posição orbital final, seu relógio estará marchando mais rapidamente do que quando estava em solo, isso é devido aos efeitos relativísticos. Para compensar esse problema, os relógios dos satélites devem ser ajustados ainda em solo. Caso essa correção não fosse efetuada, poderia gerar um erro acumulado de aproximadamente 11 Km por dia (CARARO, 2010).

No caso do posicionamento relativo, para minimizar o erro do relógio do satélite, utiliza-se uma das diferenciações de observáveis como a simples diferença (SD) entre receptores ou a dupla diferença (DD) entre receptores e satélites (LIMA, 2015). Nas DDs os erros dos relógios dos satélites e dos receptores são cancelados matematicamente, juntamente com os erros de relatividade geral no relógio do satélite, atrasos de hardware e erro dos canais do receptor.

No caso do PPP pós-processado, deve-se utilizar os dados de erros de relógio presentes nos arquivos de relógios precisos (.clk), disponibilizados pelos centros de processamento e análise do IGS, com frequências variando de 5 minutos a 5 segundos. Para a obtenção dos dados nas épocas de observação utilizam-se interpoladores.

- **Atraso das portadoras no hardware do satélite**

Antes de chegar ao centro de fase de emissão das ondas eletromagnéticas, os sinais das ondas portadoras percorrem caminhos no hardware do satélite desde suas gerações. Uma vez que o tempo de transmissão registrado é o da geração do sinal, o tempo de passagem pelo hardware deve ser levado em consideração no processamento. Conforme mencionado anteriormente, este tempo de passagem se não considerado gera um erro sistemático denominado de atraso não calibrado do código (UCD), para o caso dos códigos b_{Pi}^S ; e atraso não calibrado da Fase (UPD), para o caso das fases b_{Li}^S do satélite.

No caso do posicionamento relativo, quando se formam as duplas diferenças de observáveis, estes erros são cancelados matematicamente. Já no caso do PPP,

conforme também indicado previamente, este erro deve ser considerado no processamento quando se busca a RA, uma vez que não pode ser separado das ambiguidades nos ajustamentos e não possuem característica inteira. Outra nomenclatura utilizada para este erro é tendência instrumental do satélite.

- **Atraso entre duas portadoras no hardware do satélite e do receptor**

Os sinais das ondas portadoras percorrem diferentes caminhos nos hardwares do satélite e do receptor durante o rastreo GNSS. Isso faz com que haja um atraso entre as duas portadoras, que é denominado de *Interfrequency bias* (IFB), sendo chamado de Tendência Diferencial do código (DCB – do inglês *Differential Code Bias*) para códigos e Tendência Diferencial da fase (DPB – do inglês *Differential Phase Bias*) para as fases. Além dos diferentes caminhos percorridos pelos sinais das portadoras, também pode haver uma tendência devido à sincronização imperfeita na modulação dos sinais dos códigos C/A e P(Y) (MONICO, 2008).

Durante a fase de testes dos satélites, a magnitude do DCB e do DPB é determinada de forma relativa e introduzida como parte das mensagens de navegação, sendo designada por TGD (*Timing Group Delay*) e distinta para cada satélite. Como esse valor se altera com o tempo, o mesmo é estimado com base em estações terrestres (HEGARTY, 2005; LIMA, 2015) e divulgados aos usuários em arquivos com extensão .dcb pelos centros de análise do IGS.

- **Centro de fase da antena do satélite**

O centro de fase da antena do satélite é o ponto de referência da emissão dos sinais GNSS. Porém, o ponto de referência para as coordenadas disponibilizadas nas efemérides precisas é o centro de massa do satélite. Para um posicionamento de alta precisão é necessária a correta localização do centro de fase em relação ao centro de massa. Geralmente, os deslocamentos do centro de fase são dados em um sistema de coordenadas fixo no satélite, tendo como origem o seu centro de massa. Eles são calculados por alguns centros de análises do IGS, e disponibilizados no formato *Antenna Exchange* (ANTEX), com várias antenas de receptores. Esses valores devem ser convertidos para um sistema fixo na Terra, como o ITRF2014 (LIMA, 2015 e MONICO, 2008).

2.2.1.2 Erros relacionados com a propagação do sinal

- **Refração ionosférica**

A ionosfera é a parte superior da atmosfera terrestre, entre aproximadamente 50 e 1000 km. A propagação do sinal no domínio da radiofrequência é afetada principalmente por partículas carregadas (elétrons e íons) livres (SEEBER, 2003). Diferente da troposfera, a ionosfera comporta-se como um meio dispersivo na propagação do sinal. No meio dispersivo, a velocidade de fase pode exceder a velocidade do vácuo c , o que, de acordo com a teoria da relatividade, não ocorre na velocidade do grupo (CAMARGO, 1999).

Após a desativação da técnica SA (*Selective Availability* – Disponibilidade Seletiva) às 04 horas UT (Universal Time – Tempo Universal) de 02 de maio de 2000, o efeito da ionosfera tornou-se a maior fonte de erro sistemático no posicionamento com GNSS (MATSUOKA e CAMARGO, 2004). Quanto maior o ruído, maior será o erro de posição e maior será o tempo de convergência. O impacto do estado da ionosfera na propagação de ondas é diretamente proporcional ao Conteúdo Total de Elétrons ou *Total Electron Content* (TEC), sendo este expresso por:

$$TEC = \int_S^R n_e(d) ds, \quad (10)$$

onde n_e é a densidade eletrônica, em número de elétrons/m³ ou número de elétrons/cm³; d é o caminho percorrido do sinal eletromagnético.

A integral contém o número total de elétrons que são incluídos em uma coluna com uma área de seção transversal de 1 m², contados ao longo do caminho do sinal percorrido entre o satélite e o receptor. A densidade eletrônica é altamente variável e depende principalmente: da localização geográfica, da hora do dia, da estação do ano, da atividade solar, das anomalias Equatorial e Magnética e de irregularidades ionosféricas (SEEBER, 2003; DAL POZ, 2010).

Os erros devido à ionosfera para a fase (Equação (11)) e o código (Equação (12)), ao longo da direção satélite e antena do receptor, são dados em função do TEC e da frequência do sinal (f) (SEEBER, 2003):

$$I_i = -\frac{40,3}{f_i^2} TEC \quad (11)$$

$$I_i = + \frac{40,3}{f_i^2} TEC \quad (12)$$

Com as Equações (11) e (12), pode-se verificar que o código e as observáveis de fase na mesma frequência sofrem a mesma quantidade de efeito ionosférico, mas com sinais opostos, portanto, sua soma é livre de ionosfera (CAMARGO, 1999; SHEN, 2002). Devido ao fato de se ter duas portadoras com frequências distintas e a refração ionosférica se comportar de maneira distinta para ambas, é possível utilizar a combinação IF em receptores de dupla frequência para eliminar os efeitos de primeira ordem da ionosfera (Equações (4), (5), (7) e (8)). Os efeitos de ordem superior e quaisquer outros erros não modelados são geralmente mesclados no termo de ruído da observação. A formulação matemática para se chegar ao efeito ionosférico das Equações (11) e (12), pode ser encontrada em SEEBER (2003).

Na TABELA 1 é apresentado o erro máximo, na direção vertical, que a refração ionosférica pode causar nas portadoras L1, L2 e na combinação linear livre da ionosfera (L1/L2).

TABELA 1 - ERRO MÁXIMO DA REFRAÇÃO IONOSFÉRICA NA DIREÇÃO VERTICAL

Frequência	Efeito de 1° Ordem (m) ($1/f^2$)	Efeito de 2° Ordem (m) ($1/f^3$)	Efeito de 3° Ordem (m) ($1/f^4$)
L1	32,50	0,036	0,002
L2	53,50	0,076	0,007
L1/L2	0,00	0,026	0,006

FONTE: Adaptado de Seeber (2003).

Para o caso de receptores monofrequência, os valores de TEC podem ser obtidos via arquivo IONEX disponibilizados por alguns centros de processamento e análise do IGS. Uma opção é estimar o TEC como incógnita (parâmetro) no ajustamento de observações. A metodologia empregada para a obtenção do TEC, utilizando-se dados de receptores GNSS de dupla frequência, pode ser encontrada em Matsuoka e Camargo (2004).

- **Refração troposférica**

A refração troposférica é causada pelos gases hidrostáticos e não hidrostáticos presentes na neutrosfera. Esses gases geram uma curvatura e um atraso no sinal GNSS, causando um erro na acurácia do posicionamento que pode chegar à 30 metros dependendo do ângulo de elevação do satélite (GOUVEIA, 2019). Os efeitos da refração troposférica são abordados na seção 2.5.

- **Perdas de ciclos**

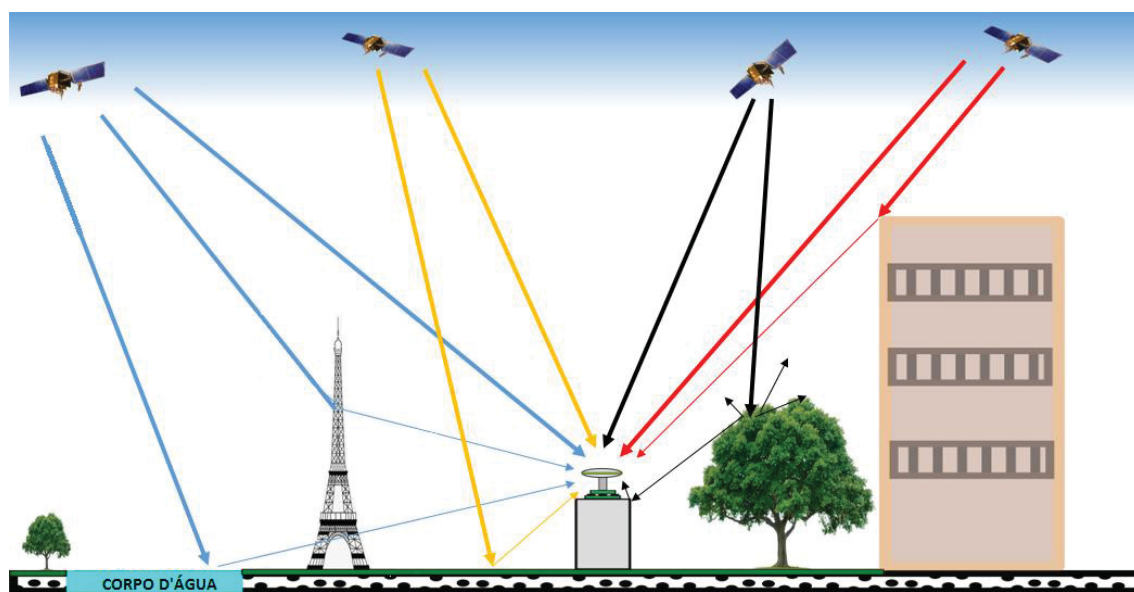
Em um ambiente amplo, sem obstáculos nos sinais GNSS, as medidas de fase são geralmente contínuas durante o período de rastreo, o que faz com que o número inteiro de ciclos entre o satélite e o receptor, na primeira época de observação, permaneça constante durante todo o período de observação. Entretanto, esse não é o caso da maioria dos levantamentos. Geralmente pode ocorrer bloqueio dos sinais de um ou mais satélites devido a elementos nas proximidades (árvores, montanhas, etc.), e também à variações bruscas na atmosfera, interferências de outras fontes de rádio, entre outros fatores, impedindo que os sinais cheguem até o receptor. Isso ocasiona a perda na contagem do número inteiro de ciclos medidos no receptor (MONICO, 2008; HIEU *et al.*, 2014).

Pode-se corrigir as perdas de ciclo localizando-se o instante em que ocorreu o salto, porém, se houver muitas ocorrências, a solução pode ser inviabilizada. As perdas de ciclo estão intrinsicamente relacionadas à questão da RA (MONICO, 2008; HIEU *et al.*, 2014).

- **Multicaminho**

Durante o período de rastreo, o receptor recebe os sinais que chegam diretamente à antena, porém, além destes, sinais que foram refletidos em superfícies vizinhas, como árvores, edificações, carros, e outros, também podem ser recebidos (FIGURA 1). Esse fenômeno de recepção dos sinais indiretos é denominado multicaminho. Ele pode provocar distorções na fase da onda portadora e na modulação sobre ela. A magnitude é bem maior na pseudodistância (KRUEGER, 1996; FARRET, 2000; CARARO, 2006; EURIQUES, 2019).

FIGURA 1 - ILUSTRAÇÃO DO EFEITO DE MULTICAMINHO NO POSICIONAMENTO GNSS



FONTE: Euriques (2019).

O multicaminho é função da movimentação da geometria satélite/receptor, e apresenta maior efeito em satélites com baixo ângulo de elevação. Além de influenciar na acurácia do posicionamento, pode fazer com que haja perdas de ciclo na fase da onda portadora. Esse efeito pode ser minimizado utilizando-se antenas construídas com base na polarização dos sinais GNSS e também antenas apropriadas para reduzir esse efeito, como a *choke ring* e *pinwheel*, além de materiais atenuadores (MONICO, 2008; EURIQUES, 2019).

• Rotação da Terra

O eixo de rotação da Terra e seu plano equatorial rotacionam em relação a um sistema inercial como o GCRS (*Geocentric Celestial Reference System*). Além disso, durante a propagação do sinal o sistema de coordenadas terrestre rotaciona em relação ao satélite, alterando suas coordenadas. A transmissão de um sistema de referência inercial para outro rotacional provoca um efeito relativístico denominado efeito Sagnac (WANG, 2014). Esse efeito pode provocar discrepâncias de cerca de 240 ns a 350 ns, o que é bastante significativo para os sinais GNSS (CARARO, 2006), já que em um nanossegundo a luz percorre aproximadamente 30 cm. Em vista disso, é necessário corrigir as coordenadas dos satélites do movimento de rotação da Terra.

Isso pode ser feito aplicando-se rotações quando as coordenadas dos satélites estiverem no sistema terrestre (LIMA, 2015 e SEEBER, 2003, WANG, 2014). Elas devem ser rotacionadas de um ângulo α , em radianos, que é o produto do tempo de propagação (τ) pela velocidade de rotação da Terra (w_e) (MONICO, 2008). Sendo X' , Y' e Z' as coordenadas originais do satélite e X , Y , e Z as corrigidas, tem-se:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \alpha & 0 \\ -\alpha & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix}. \quad (13)$$

2.2.1.3 Erros relacionados com o receptor e antena

- **Erro do relógio do receptor**

Os receptores GNSS são equipados com relógios de boa estabilidade e baixo custo, como os osciladores de quartzo. Dessa forma, cada receptor possui seu próprio Sistema de Tempo que difere do Sistema de Tempo de referência de cada sistema de posicionamento GNSS (GPS, GLONASS ou Galileo). Esta diferença é denominada erro do relógio do receptor (SHEN, 2002; MONICO, 2008).

No posicionamento relativo, o erro do relógio em relação ao tempo GPS é cancelado matematicamente através da SD entre satélites. No posicionamento PPP, esse erro é tratado como parâmetro desconhecido, juntamente com as coordenadas tridimensionais do receptor, sendo estimado para cada época de rastreo (SHEN, 2002; MONICO, 2008).

- **Centro de fase da antena do receptor**

Assim como o centro de fase da antena do satélite não coincide com o centro de massa do satélite, o centro de fase da antena do receptor, que é o ponto virtual onde as medidas dos sinais são referenciadas, em geral, não coincide com o centro mecânico da mesma. Como esse ponto de referência não pode ser acessado por medidas, utiliza-se outro ponto de referência que seja acessível, o qual é denominado de Ponto de Referência da Antena (ARP – do inglês *Antenna Reference Point*).

Torna-se então necessário conhecer o deslocamento entre esses centros de referência (PCO – do inglês *Phase Center Offset*). O grande problema é a

instabilidade do centro de fase (PCV – do inglês *Phase Center Variation*), que varia com a intensidade e a direção dos sinais, e é diferente para cada uma das ondas portadoras. Assim sendo, suas variações também devem ser levadas em consideração. A calibração da antena proporciona a relação entre o ARP e o centro de fase, e deve ser feita para todas as antenas envolvidas no rastreamento em prol da correção desse efeito (LEICK, 2004).

A posição do receptor é estimada onde se encontra a antena. Quando se deseja alcançar qualidade posicional milimétrica, é necessário que os erros decorrentes da variação do centro de fase da antena do receptor sejam conhecidos e modelados. Caso contrário, podem ocorrer discrepâncias de até 10 cm na componente altimétrica se os erros forem negligenciados. A modelagem depende do conhecimento dos parâmetros associados à localização do centro de fase, PCO e PCV (FREIBERGER JUNIOR, 2007; HUINCA, 2014), que são determinados mediante procedimentos de calibração em caráter absoluto ou relativo (MORESCKI JUNIOR, 2015).

Os deslocamentos entre o centro de fase da antena e o centro mecânico da mesma também são providos pelo NGS-NOOA (*National Geodetic Survey- National Oceanic and Atmospheric Administration*) dos EUA, nos formatos ANTEX e ANTINFO para muitas antenas receptoras de diversos fabricantes. Esses valores também devem ser convertidos para um sistema fixo na Terra, como o ITRF2014 (LIMA, 2015; MONICO, 2008).

- **Fase *Wind-up* ou *Wrap-up***

Os sinais GNSS são polarizados circularmente à direita, e dependem diretamente da orientação das antenas emissora e receptora. Uma mudança na orientação da antena receptora gera uma mudança na direção de referência e, conseqüentemente, mudança na fase medida. O mesmo ocorre alterando-se a orientação da antena transmissora. Conforme as antenas do receptor e do satélite rotacionam entre si, ocorre uma mudança na observação da fase, sendo denominada de fase *wind-up* (MONICO, 2008).

A rotação da antena de satélite deve-se principalmente ao fato do painel solar estar orientado para o Sol enquanto a geometria satélite/receptor muda. Em casos normais, a correção da fase *wind-up* pode ser modelada. Entretanto, há

alguns casos especiais em que a antena de satélite é submetida a uma rápida rotação, o que provoca uma anomalia da orientação do satélite e torna difícil a utilização de modelos para calcular a rotação da antena de satélite. Porém, os satélites que possuem anomalia de orientação podem ser editados no processamento dos dados (WANG, 2014).

Os centros de análises do IGS aplicam essa correção desde 1994. A desconsideração desse efeito pode provocar erros da ordem de decímetros nas posições determinadas. Para o PPP, quando se deseja alta precisão (poucos mm), esse efeito não pode ser desprezado (DE OLIVEIRA JUNIOR, 2017).

- **Atraso das portadoras no hardware do receptor**

Após chegar ao centro de fase de recepção das ondas eletromagnéticas no receptor, os sinais das ondas portadoras percorrem caminhos no hardware do receptor até o seu “ponto final”. Uma vez que o tempo de recepção registrado é o da chegada a este ponto, o tempo de passagem pelo hardware deve ser levado em consideração no processamento. Ao caminho do hardware pode ainda ser acrescentado, se for o caso, o caminho percorrido pelo sinal quando este atravessa algum tipo de cabeamento.

Se não levados em consideração, estes tempos de passagem tornam-se erros sistemáticos denominados também de UCD, para o caso dos códigos $b_{p_i}^r$; e UPD, para o caso das fases $b_{L_i}^r$ ambos para o receptor.

Para o caso do posicionamento relativo, assim como no caso das tendências instrumentais do satélite, quando se formam as duplas diferenças de observáveis, estes erros são cancelados matematicamente. No caso do PPP com RA, este erro deve ser levado em conta. Uma nomenclatura alternativa para este erro é tendência instrumental do receptor.

- **Erro entre os canais**

A maioria dos receptores GNSS possui canais múltiplos. Desse modo, o sinal de um satélite particular percorrerá diferentes caminhos eletrônicos. Essa questão pode ocasionar um erro sistemático entre os canais do receptor. Para contornar esse erro, no início do rastreamento é realizada uma calibração utilizando-se um canal tomado como padrão. No posicionamento relativo os efeitos residuais são

praticamente eliminados na diferenciação das observações. No PPP é recomendado que o efeito residual seja estimado como parâmetro agrupado com o erro do relógio do receptor (MONICO, 2008; SEEBER, 2003).

2.2.1.4 Erros relacionados com a estação

- **Marés terrestres**

A atração gravitacional indireta do Sol e da Lua, bem como de outros corpos, como planetas, causa uma deformação da crosta terrestre, cujo efeito é denominado maré terrestre. Em termos de intensidade, consideram-se apenas os efeitos do Sol e da Lua. O primeiro pelo seu tamanho e o segundo pela sua proximidade com a Terra. Essa deformação é calculada por modelos que se baseiam no movimento dos corpos celestes, com base na latitude do local. Esse efeito só pode ser medido a partir de observações de sistemas de satélites e gravímetros de alta sensibilidade e com marégrafos. Ele está em função do tempo e da posição da estação, e é desprezado no posicionamento relativo em linha de base curta (>20 km), devido à sua pequena variação ao longo da superfície terrestre. No entanto, o mesmo deve ser considerado no PPP. A amplitude pode chegar a 40 cm na componente vertical e 5 cm na horizontal (MCCARTHY e PETIT, 2004).

A relação entre o potencial de maré e seu deslocamento é fornecida pelos números Love e Shida, os quais são disponibilizados pelo IERS (*International Earth Rotation and Reference Systems Service*). Essas grandezas dependem da latitude e longitude do ponto, da frequência de maré (longo período, diurna e semi-diurna) e do grau de desenvolvimento dos coeficientes em séries de funções harmônicas esféricas do potencial gravitacional. A maior parte dos efeitos é eliminada nos harmônicos esféricos de grau dois, restando um efeito com grandeza na ordem do milímetro (MOREIRA, 2016).

- **Carga de marés oceânicas**

A força de maré causa uma variação cíclica no nível médio do mar de determinado local, podendo atingir cerca de 10 metros. Ela causa um deslocamento cuja magnitude depende das características elásticas da crosta e das posições do Sol, da Lua e da estação. Pode ser medida em relação a crosta terrestre, e alcançar

cerca de 10 cm na componente vertical em determinadas regiões. O efeito da carga de maré decresce em regiões afastadas da costa, mas deve ser levado em consideração em levantamentos de alta precisão (MONICO, 2008).

O IERS sugere correções baseadas em modelos de maré oceânica. O modelo de maré recomendado pelo IERS (2010) corresponde ao FES2004 (LYARD *et al.*, 2006), que contempla a modelagem de marés com base em modelagem hidrodinâmica, em dados de altimetria por satélite e em dados de marégrafos (MOREIRA, 2016).

- **Carga atmosférica**

A massa atmosférica exerce força sobre a superfície terrestre, e variações em sua distribuição induzem deformações sobre a crosta, principalmente na direção vertical. Grandes variações de pressão da atmosfera são observadas em diversas regiões do planeta, e contribuem para a deformação da crosta (PILAPANTA AMAGUA, 2018). A carga atmosférica está em função da altitude, da latitude e da proximidade ao oceano (MOREIRA, 2016).

O IERS sugere correções de carga atmosférica baseadas em modelos geofísicos e em modelos empíricos regionais. Também pode-se utilizar modelos de previsão numérica de tempo, como o Centro Europeu de Previsões Meteorológicas de Médio Prazo (ECMWF - *European Centre of Medium-range Weather Forecasts*) e NCEP (*National Center for Environmental Prediction*). Segundo o IERS (2010), esse fenômeno pode atingir variações de 8 mm na horizontal e 25 mm na vertical, podendo apresentar magnitude significativa para algumas aplicações GNSS, como é o caso da realização de redes de referência.

- **Movimento do Polo**

Os sistemas de referência geodésicos são baseados em uma configuração da Terra, tida como fixa, cujo polo médio coincide com o eixo Z do Sistema de coordenadas geocêntrico tridimensional utilizado no Sistema de Referência Terrestre Internacional (ITRS – do inglês *International Terrestrial Reference System*). No entanto, as forças de maré do Sol e da Lua, além de outros fenômenos atmosféricos e geodinâmicos (como terremotos e tsunamis), provocam uma variação do eixo de

rotação da Terra em relação ao eixo de rotação médio, denominada de movimento do polo (MOREIRA, 2016).

Esse fenômeno causa uma variação nas coordenadas das estações que pode atingir cerca de 25 mm na componente radial, e não diminui com o aumento do tempo de rastreo. Devendo ser considerada no posicionamento geodésico de alta precisão. Esse movimento é um dos elementos que conecta os sistemas de referência Celeste Internacional (ICRS – do inglês *International Celestial Reference System*) e o ITRS. O mesmo deve ser tratado na estimativa de órbitas de satélites (SEEBER, 2003).

2.3 COMBINAÇÕES LINEARES UTILIZADAS NO PPP COM RESOLUÇÃO DE AMBIGUIDADES

Certas combinações lineares das observáveis GNSS têm papel importante para a RA no PPP, pois possibilitam a eliminação de certos erros. De forma geral, para a RA, é interessante utilizar combinações que possuam comprimentos de onda maiores e com baixo ruído. Em vista disso, a combinação linear *Wide-Lane* (WL) é bastante utilizada na RA no PPP (LIMA, 2015). Outro exemplo é a combinação linear Melbourne–Wübbena (MW) (WÜBBENA, 1985), que envolve o código e a fase facilitando a RA por meio da eliminação dos efeitos da ionosfera, relógio, troposfera e geometria (LIMA, 2015).

A combinação de fase WL é dada pela Equação (14) com os coeficientes $\alpha_{WL} = f_1/(f_1 - f_2)$ e $\beta_{WL} = f_2/(f_1 - f_2)$ (SHI e GAO, 2014):

$$L_{WL} = \alpha_{WL} * L_1 - \beta_{WL} * L_2 = \rho + c(dt^r - dt^s) + T_r^s - \frac{f_1^2}{f_2^2} I_1 - \quad (14)$$

$$\lambda_{WL} N_{WL} + (\alpha_{WL} b_{L1}^r + \beta_{WL} b_{L2}^r) - (\alpha_{WL} b_{L1}^s + \beta_{WL} b_{L2}^s) + \varepsilon_{LWL},$$

sendo b_L^r e b_L^s as tendências Instrumentais do receptor e do satélite; λ_{WL} o comprimento de onda WL. No caso de se fazer a combinação com as portadoras L_1 e L_2 , a ambiguidade WL (N_{WL}) é dada por (LIMA, 2015): $N_{WL} = N_1 - N_2$. Vale ressaltar que a combinação WL também pode ser feita com a portadora L5.

Outra combinação que é utilizada no contexto de RA no PPP é a chamada Narrow-Lane (NL). Assim, tem-se, por exemplo, para os códigos nas portadoras L1 e L2 (SHI e GAO, 2014):

$$\begin{aligned}
P_{WL} &= \alpha_{NL}P_1 + \beta_{NL}P_2 \\
&= \rho + c(dt^r - dt^s) + T_r^s + \frac{f_1^2}{f_2^2}I_1 + (\alpha_{NL}b_{P_1}^r + \beta_{NL}b_{P_2}^r) \\
&\quad - (\alpha_{NL}b_{P_1}^s + \beta_{NL}b_{P_2}^s) + \varepsilon_{P_{NL}},
\end{aligned} \tag{15}$$

com $\alpha_{NL} = f_1/(f_1 + f_2)$ e $\beta_{NL} = f_2/(f_1 + f_2)$.

Após algumas manipulações matemáticas, é possível construir uma importante relação entre as ambiguidades das combinações lineares WL, NL e IF. De forma que (SHI e GAO, 2014):

$$N_{IF} = 17N_{NL} + 60N_{WL}. \tag{16}$$

Para a RA, mais duas combinações livres de ionosfera são necessárias, a combinação MW, que é uma combinação entre a WL para a fase e a NL para o código (Equação (17)). Além de uma combinação entre a fase e a pseudodistância, ambas livres de ionosfera (Equação (18)).

$$A_{MW} = L_{WL} - P_{NL} = -\lambda_{WL}N_{WL} + (b_{A_{MW}}^r - b_{A_{MW}}^s) + \varepsilon_{A_{MW}}, \tag{17}$$

$$A_{IF} = -\lambda_{IF}\Delta N_{IF} + (b_{L_{IF}}^r - b_{P_{IF}}^r) - (b_{L_{IF}}^s - b_{P_{IF}}^s) + \varepsilon_{A_{IF}}. \tag{18}$$

Nas Equações (17) e (18), as tendências do receptor e do satélite são dadas pelas Equações (19) e (20), respectivamente.

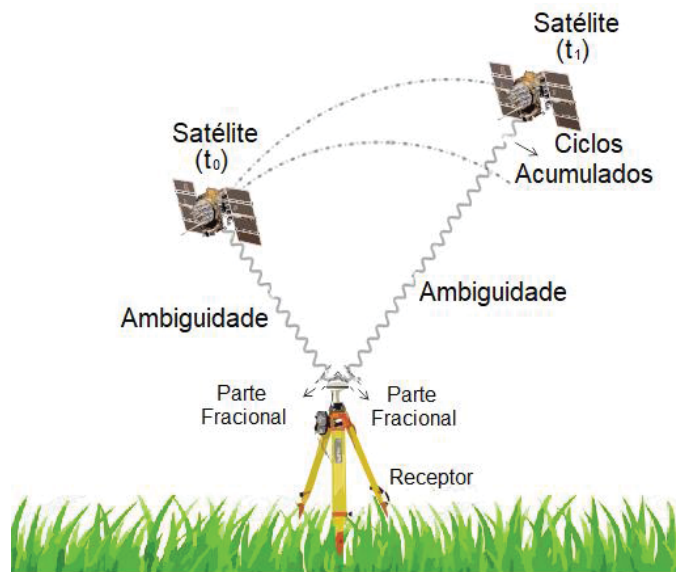
$$b_{A_{MW}}^r = (\alpha_{WL}b_{L_1}^r + \beta_{WL}b_{L_2}^r) - (\alpha_{NL}b_{P_1}^r + \beta_{NL}b_{P_2}^r), \tag{19}$$

$$b_{A_{MW}}^s = (\alpha_{WL}b_{L_1}^s + \beta_{WL}b_{L_2}^s) + (\alpha_{NL}b_{P_1}^s + \beta_{NL}b_{P_2}^s). \tag{20}$$

2.4 MÉTODOS DE RESOLUÇÃO DAS AMBIGUIDADES NO PPP

A ambiguidade representa o número inteiro de ciclos formado entre o satélite e o receptor no instante da primeira observação. A interpretação geométrica da ambiguidade está ilustrada na FIGURA 2.

FIGURA 2 – ILUSTRAÇÃO PARA INTERPRETAÇÃO GEOMÉTRICA DA AMBIGUIDADE



FONTE: Adaptado de Alves *et al.*, (2011).

Inicializando-se o rastreamento com o receptor GNSS, ele calcula a diferença entre a fase emitida pelo satélite e sua réplica gerada no receptor. Esse valor é um número real fracionário, onde a parte inteira representa as ambiguidades e a parte fracionária representa os UPDs, originados no receptor e no satélite.

Conforme obtém-se os dados, o valor de [ambiguidade + UPD] vai sendo acrescido de um número inteiro de ciclos. Porém, o número inteiro de ciclos no instante da primeira observação é desconhecido e permanece constante, desde que não haja interrupção do sinal recebido. O processo de separação dos UPDs das ambiguidades, ou melhor, o conhecimento do número inteiro de ciclos no instante da primeira observação é conhecido como RA.

Desse modo, as ambiguidades inteiras são representadas por (LIMA, 2015):

$$\bar{N}_r^s = N_r^s + b^r - b^s, \quad (21)$$

onde N_r^s são as ambiguidades inteiras das medições da fase da onda portadora; b^r são os componentes não calibrados do atraso de hardware do receptor; e b^s são os componentes não calibrados do atraso de hardware do satélite.

O PPP usando observações de código e fase livres de ionosfera é capaz de fornecer precisão de posicionamento na ordem do centímetro. Porém, conforme citado anteriormente, o parâmetro de ambiguidade estimado é uma combinação ambiguidade + UPDs do receptor e dos satélites. Isso faz com que a propriedade inteira do parâmetro de ambiguidade seja perdida e, assim sendo, impossibilita que

o parâmetro de ambiguidade estimado no modelo PPP convencional seja resolvido para o valor inteiro, o que faz com que a RA não seja viável (SHI e GAO, 2014).

Dessa forma, o tempo de convergência no PPP tradicional pode ser significativamente longo, dependendo da geometria receptor/satélites, uma vez que a ambiguidade estimada é real. A não RA no PPP causa dois efeitos negativos. Primeiro, demora muito tempo para alcançar a convergência dos parâmetros de ambiguidade. Em segundo lugar, a parte de ambiguidade fracionária, definida como a diferença entre ambiguidades reais e inteiras ainda permanece, mesmo após a convergência da ambiguidade. O que degrada as precisões de outros parâmetros, como as coordenadas e o atraso da troposfera (SHI, 2012).

Uma das formas mais simples de se eliminar matematicamente as tendências de satélites e receptor para a RA no PPP é utilizando-se as DD das fases entre dois receptores e dois satélites, obtendo-se a DD das ambiguidades (BLEWITT, 1989). Esse método é denominado método de eliminação dos UPDs (ALVES *et al.*, 2011), e pode ser feito da seguinte forma: utilizando-se dois receptores (r, l) e dois satélites (s, j), a DD das ambiguidades pode ser dada subtraindo-se as ambiguidades formadas entre o receptor r e os satélites s e j das ambiguidades formadas entre o receptor l e os satélites s e j , conforme Equação (22) (LIMA, 2015).

$$\bar{N}_{r,l}^{s,j} = (\bar{N}_r^s - \bar{N}_r^j) - (\bar{N}_l^s - \bar{N}_l^j). \quad (22)$$

Substituindo-se a forma da Equação (21) na Equação (22), tem-se:

$$\bar{N}_{r,l}^{s,j} = [(N_r^s + b^r - b^s) - (N_r^j + b^r - b^j)] - [(N_l^s + b^l - b^s) - (N_l^j + b^l - b^j)]. \quad (23)$$

Dessa forma, os vieses dos receptores e dos satélites são cancelados matematicamente, restando apenas os valores inteiros de ambiguidades formadas entre os satélites e os receptores.

$$\bar{N}_{r,l}^{s,j} = N_r^s - N_r^j - N_l^s + N_l^j. \quad (24)$$

A subtração das ambiguidades inteiras gera um valor inteiro de ambiguidades formado pelas DD das mesmas.

$$\bar{N}_{r,l}^{s,j} = N_{r,l}^{s,j} \quad (25)$$

A DD das ambiguidades objetivando a RA é muito utilizada no método de posicionamento relativo. Para a RA no PPP é necessária uma rede GNSS contínua de referência onde a RA é realizada, combinando-se as soluções de PPP em

simultâneas estações observadas. Porém, a precisão da RA fica limitada pela questão da distância em relação às estações de referência. Mais informações sobre a DD das ambiguidades no PPP podem ser encontradas em Alves *et al.*, (2011).

Até recentemente, acreditava-se que ambiguidades inteiras só poderiam ser fixadas em medidas diferenciadas que removeriam os UPDs. Isto é, utilizando-se o método mencionado de eliminação dos UPDs. Porém, em 2008, três métodos de RA para o PPP foram descritos na literatura. O Método da Dissociação dos Relógios (Collins e Bisnath, 2008), o Método da Estimativa dos UPDs (Ge *et al.*, 2008), e o Método da Recuperação dos Relógios da Fase ou Método de Recuperação do Relógio (Laurichesse *et al.*, 2008).

Shi e Gao (2014) fizeram uma comparação dos três métodos citados em relação ao método tradicional do PPP sem RA. Em resumo, cada um dos três métodos de RA no PPP requer três correções para cada satélite. Todos exigem pelo menos cinco satélites para determinação da posição. Além disso, os três têm por base as observações de código e fase livres de ionosfera e a combinação de MW. As mesmas ambiguidades de fase (WL e NL) são resolvidas (SHI E GAO, 2014).

Algumas diferenças entre os três métodos são que os relógios de código e de fase são separados no Método da Dissociação dos Relógios; são feitas correções de ambiguidade no Método da Estimativa dos UPDs; e ambos os procedimentos são realizados no método de Recuperação do Relógio. Além disso, o procedimento para a recuperação da propriedade inteira é feito por estimativa no ajustamento no Método da Dissociação dos Relógios; por correção da ambiguidade no Método da Estimativa dos UPDs; e por ambos no Método de Recuperação do Relógio.

Shi e Gao (2014) concluíram que, mesmo com as pequenas diferenças numéricas ocasionadas por diferentes procedimentos computacionais, se as ambiguidades de fase forem resolvidas corretamente, os três métodos fornecerão posicionamento com precisão equivalente. A seguir, será apresentado o Método de Recuperação do Relógio (Laurichesse *et al.*, 2008) que, salvo algumas alterações de configuração matemática, é o método utilizado nesta pesquisa por ser o disponível no software RTKLIB v. 2.4.2. Outras informações sobre os demais métodos citados podem ser encontradas em Shi e Gao (2014).

2.4.1 Método baseado na Recuperação dos Relógios da Fase

O Método de Relógio de Fase Inteira ou Método de Recuperação do Relógio, proposto por Laurichesse *et al.*, (2008) consiste nas funções livres de ionosfera (Equações (7) e (8)) e na função MW (Equação (17)). Além de produtos do IGS contendo erros dos relógios dos satélites para as observações de código (.clk), outro arquivo de relógio é necessário para a observação de fase. Este último contendo as informações de tendências instrumentais dos satélites para a WL (WSB – do inglês *Wide-Lane Satellite Bias*) (Equação (14)) e os chamados relógios com característica inteira (explicado mais adiante). O nome deste método foi adotado por esta característica apresentada (SHI e GAO, 2014).

Dentro da metodologia para a solução do provedor, inicialmente, a RA WL é obtida arredondando-se a mesma na combinação MW (Equação (17)). O subproduto é o WSB como a parte fracionária da observável MW. As ambiguidades NL são estimadas usando a Equação (16) com outro subproduto de relógio de fase do satélite.

Em seguida, um receptor de referência é escolhido e sua tendência instrumental *Wide-Lane* (WRB – do inglês *Wide-Lane Receiver Bias*) é assumido como zero. A parte inteira da observável MW é atribuída à ambiguidade inteira WL como:

$$\bar{N}_{WL} = -\langle A_{MW} / \lambda_{WL} \rangle. \quad (26)$$

E a parte fracional é atribuída ao WSB como:

$$b_{A_{MW}}^s = A_{MW} - \lambda_{WL} \bar{N}_{WL}. \quad (27)$$

Na sequência, o WSB calculado é usado para estimar os valores de WRBs na solução de rede. Eventualmente, um conjunto de WSB $b_{A_{MW}}^s$ é determinado na solução de rede e transmitido aos usuários.

As Equações (7) e (8) (P_{IF} e L_{IF}) são envolvidas na RA NL. Na sequência, substitui-se a Equação (16) na Equação (8), a fim de utilizar as ambiguidades NL e WL em vez da ambiguidade *ion-free*.

Já que N_{WL} já foram fixadas, elas podem ser movidas para o lado esquerdo da equação. Movendo-se junto com ela a distância geométrica e o termo troposférico, tem-se:

$$L_{IF} - 60\lambda_{IF}N_{WL} - \rho + T_r^s = cdt_{L_{IF}}^r - cdt_{L_{IF}}^s - 17\lambda_{IF}N_{NL} + \varepsilon_{L_{IF}}. \quad (28)$$

Chamando o lado esquerdo da Equação (28) de Q_{IF} , tem-se:

$$Q_{IF} = (cdt_{LIF}^r - cdt_{LIF}^s) - 17\lambda_{IF}N_{NL}. \quad (29)$$

Uma vez que no contexto de rede de referência os termos do lado esquerdo da Equação (29) são conhecidos, Q_{IF} pode ser calculado.

Para a determinação de cdt_{LIF}^s (Equação (29)), primeiro usa-se o receptor de referência escolhido na RA WL e define-se cdt_{LIF}^r como zero. Segundo, define-se o *datum* de ambiguidade do receptor de referência atribuindo valores inteiros arbitrários para todas as N_{NL} dos satélites observados. Terceiro, as estimativas iniciais do cdt_{LIF}^s dos satélites observados são derivadas como parte fracional de $-Q_{IF} - 17\lambda_{IF}N_{NL}$ (Equação (29)). Apenas os cdt_{LIF}^s dos satélites observados são derivados nessa etapa. Em seguida, um novo receptor integrante da rede de referência é adicionado. Com as estimativas iniciais do cdt_{LIF}^s obtidas no terceiro passo, a soma $Q_{IF} + cdt_{LIF}^s$ pode ser calculada (SHI e GAO, 2014).

Aplicando o arredondamento, a parte inteira é atribuída a N_{NL} e a parte fracional ao cdt_{LIF}^r . Uma vez que N_{NL} e cdt_{LIF}^r são conhecidos, pode-se determinar cdt_{LIF}^s para os satélites que não foram observados no terceiro passo.

Em seguida, os cdt_{LIF}^s obtidos anteriormente, são adicionados aos obtidos no terceiro passo. No quinto passo, outro receptor da rede de referência é adicionado, e o quarto passo é repetido até que um conjunto completo de cdt_{LIF}^s seja obtido. Seguindo os procedimentos descritos anteriormente, as ambiguidades N_{NL} inteiras podem ser obtidas. Além disso, um conjunto de cdt_{LIF}^s é determinado na solução de rede e transmitido aos usuários (SHI e GAO, 2014). Estes erros de relógio dos satélites calculados têm a propriedade de preservar a natureza inteira das ambiguidades, sendo então chamados “relógios de fase” (LAURICHESSE *et al.*, 2009; MERCIER e LAURICHESSE, 2008).

As correções necessárias na solução do usuário são a correção WSB, juntamente com produtos de relógio (de código de satélite IGS e o relógio de fase do satélite, descrito no parágrafo anterior). Estas soluções de relógio juntamente com os valores de WSB para cada satélite GPS são disponibilizadas na solução do centro de análise IGS CNES / CLS (*Collecte Localisation Satellites*), desde 2009, e são chamados produtos .GRG (DE OLIVEIRA JUNIOR, 2017).

Na solução do usuário, primeiro aplica-se a correção de WSB e a correção de WRB média por satélite para obter a RA WL. Em um segundo passo, as ambiguidades inteiras NL podem ser estimadas diretamente com o relógio de fase do satélite determinado na solução de rede.

Para a RA WL, a observação MW pode ser derivada como:

$$A_{MW_u} = (b_{A_{MW_u}}^r - b_{A_{MW}}^s) - \lambda_{WL} N_{WL}. \quad (30)$$

Aplicando a correção de WSB tem-se:

$$\begin{aligned} A_{MW_u} + b_{A_{MW}}^s &= (b_{A_{MW_u}}^r - b_{A_{MW}}^s) - \lambda_{WL} N_{WL} + b_{A_{MW}}^s \\ &= -\lambda_{WL} N_{WL_u} + b_{A_{MW_u}}^r. \end{aligned} \quad (31)$$

Pode-se observar que a RA WL depois de corrigida do $b_{A_{MW}}^s$, ainda é contaminada por $b_{A_{MW_u}}^r$. Como $b_{A_{MW_u}}^r$ é o mesmo para todos os satélites, ele pode ser obtido pela média das partes fracionais das ambiguidades reavaliadas de todos os satélites observados como (SHI e GAO, 2014):

$$\bar{b}_{A_{MW_u}}^r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(A_{MW_u} + b_{A_{MW}}^s) - \lambda_{WL} \langle (A_{MW_u} + b_{A_{MW}}^s) / \lambda_{WL} \rangle]_i, \quad (32)$$

onde n representa o número de satélites observados.

Assim, pode-se obter: $A_{MW_u} + b_{A_{MW}}^s - \bar{b}_{A_{MW_u}}^r = -\lambda_{WL} N_{WL_u}$ através da qual a RA WL do usuário pode ser alcançada.

Para a RA NL, substitui-se a Equação (16) na Equação (8) e, em seguida, move-se as ambiguidades WL fixadas para o lado esquerdo, dessa forma, tem-se:

$$L_{IF} - 60\lambda_{IF} N_{WL} = \rho + cdt_{L_3}^r - cdt_{L_3}^s + T_r^s - 17\lambda_{IF} N_{NL} + \varepsilon_{LIF}. \quad (33)$$

Com cdt_{LIF}^s e $cdt_{P_{IF}}^s$ já definidos, as Equações (7) e (33) são usadas para estimar as coordenadas do usuário, juntamente com $cdt_{P_{IF}}^r, cdt_{LIF}^r, T_r^s$ e N_{NL} .

Supondo observações a n satélites, o número de observações é $2n$. O *datum* de ambiguidade é necessário, o qual pode ser obtido fixando-se N_{NL} do satélite de referência para um valor inteiro arbitrário. O número de parâmetros desconhecidos é $3 + 2 + 1 + (n - 1) = (n - 5)$, que inclui três coordenadas do receptor, dois relógios de código de receptor ($cdt_{P_{IF}}^r, cdt_{LIF}^r$), um atraso de troposfera (T) e $(n - 1)$ ambiguidades (N_{NL}). Sendo necessário no mínimo 5 satélites para aplicar o método de relógio de fase inteiro.

2.5 REFRAÇÃO TROPOSFÉRICA

A camada da atmosfera da superfície terrestre até aproximadamente 50 km é denominada atmosfera neutra, por ser formada por átomos e moléculas não carregados, os quais são bem misturados e, assim, tornam essa camada praticamente um gás neutro (SEEBER, 2003; LIMA, 2015).

A atmosfera neutra compreende a troposfera, tropopausa, estratosfera e parte da estratopausa. Devido à concentração dos gases presentes nessa camada, a mesma comporta-se como um meio não dispersivo para os sinais com frequências abaixo de 30 GHz, como é o caso das frequências L1, L2 e L5 do GPS, sendo uma das maiores fontes de erro sistemático no posicionamento GNSS (MONICO, 2008; SEEBER, 2003; ALVES, 2010).

Entre os efeitos troposféricos podem-se citar a atenuação atmosférica, a cintilação troposférica e o atraso troposférico. Esses efeitos variam conforme o ângulo de elevação do satélite, pois ângulos de elevação mais baixos produzem uma trajetória do sinal mais longa pela troposfera. Também variam com a densidade do gás atmosférico em relação à altitude (SPILKER, 1996).

No que se refere à atenuação atmosférica, essa está relacionada à diminuição da potência da onda eletromagnética ao atravessar a atmosfera neutra, variando para cada frequência. Essa atenuação na banda de frequência de 1-2 GHz é dominada pelo oxigênio, mas esse efeito normalmente é pequeno para as máscaras de elevação usualmente utilizadas, maiores que 10 graus. O uso de satélites GNSS abaixo da elevação de aproximadamente 5 graus pode não apenas aumentar os efeitos da atenuação troposférica, como também as incertezas no atraso troposférico e ionosférico e os efeitos de cintilação causados pela troposfera e ionosfera (SPILKER, 1996; PEREIRA *et al.*, 2016).

A cintilação troposférica é a oscilação na amplitude da onda eletromagnética, causada por irregularidades e turbulência no índice de refração atmosférica, principalmente nos primeiros quilômetros acima do solo (GOUVEIA *et al.*, 2017; MONICO, 2008). O sinal sofre uma combinação de absorção aleatória e espalhamento que, por sua vez, causam oscilação na amplitude e cintilação de fase na forma de onda recebida. O efeito de cintilação varia com o tempo e depende da frequência, do ângulo de elevação e das condições climáticas, especialmente nuvens densas. Em ângulos de elevação acima de 10 graus, o efeito predominante

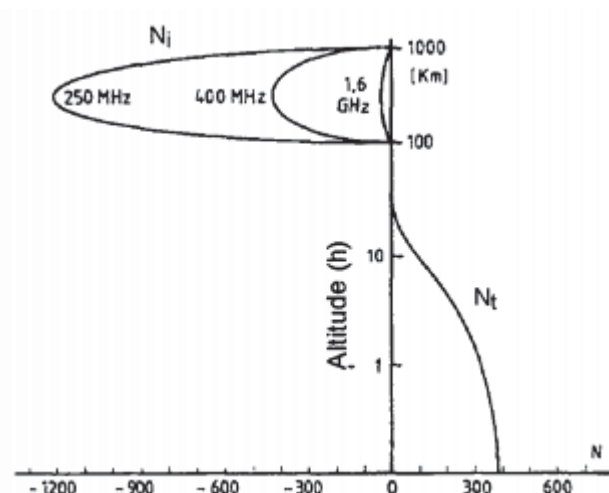
é o espalhamento direto causado pela turbulência atmosférica. Nas frequências de GNSS, para ângulos de elevação menores do que 5 graus, esses efeitos são geralmente pequenos (SPILKER, 1996).

2.5.1 Atraso Troposférico

Das camadas presentes na atmosfera neutra, a troposfera é a que exerce a maior influência nos sinais GNSS, causando um atraso nos sinais de radiofrequência que a atravessam, por esse motivo o efeito provocado pelas camadas da atmosfera neutra é denominado atraso troposférico ou refração troposférica, mesmo que a refração seja devida não apenas a essa camada, mas sim a atmosfera neutra como um todo (SAPUCCI, 2001; DE ABREU *et al.*, 2014; ALVES *et al.*, 2015).

Na FIGURA 3 é apresentado o comportamento do índice de refração ($N = (n - 1) * 10^{-6}$) na ionosfera e na troposfera. Na ionosfera N é negativo e diminui com o aumento da frequência. Já na troposfera, N é positivo e independente da frequência do sinal, dependendo principalmente das propriedades termodinâmicas do ar: conteúdo do vapor d'água, pressão do ar e temperatura da camada atmosférica (SAPUCCI, 2001; SEEGER, 2003).

FIGURA 3 – COMPORTAMENTO DO ÍNDICE DE REFRAÇÃO NA IONOSFERA E NA TROPOSFERA



FONTE: Seeber (2003).

Dependendo da massa gasosa que se concentra nas baixas camadas da atmosfera terrestre e do ângulo de elevação do satélite, o efeito da troposfera pode

aumentar cerca de 10 vezes à medida que se aproxima do horizonte, ou seja, aproximadamente 30m (SEEBER, 2003; DE OLIVEIRA, 2013). Essa massa gasosa é composta por duas componentes: a de gases secos, componente hidrostática; e a de vapor d'água, denominada componente não hidrostática (GOUVEIA, 2019). Os termos hidrostático e não hidrostático são determinados separadamente, pois apresentam características distintas e, conseqüentemente, afetam os sinais GNSS de maneira diversa (SPILKER, 1996; DE OLIVEIRA JUNIOR, 2016; GOUVEIA *et al.*, 2017).

O sinal de uma fonte de rádio distante recebido por uma antena localizada na superfície da Terra será refratado pela atmosfera neutra, a qual introduz um atraso que depende do índice de refração ao longo do caminho real percorrido pelo sinal recebido. Para uma atmosfera que é azimutalmente simétrica em relação à antena receptora, este atraso depende apenas do perfil vertical da atmosfera e do ângulo de elevação da fonte de rádio. A função que descreve essa dependência do ângulo de elevação do atraso atmosférico é denominada função de mapeamento (DAVIS *et al.*, 1985; NIELL, 1996; GOUVEIA, 2019).

O atraso troposférico total (T) é causado quando o índice de refração n dos gases atmosféricos é ligeiramente maior do que no vácuo (em que $n = 1$), o que faz com que a velocidade da luz (velocidade de grupo) no meio diminua em relação ao valor da velocidade da luz no vácuo c . O índice de refração diminui com o aumento da altura e se torna quase 1 no limite superior da troposfera, correspondendo à densidade continuamente decrescente do meio (SEEBER, 2003; GOUVEIA, 2019).

Assim, um raio com um comprimento de caminho infinitesimal ds que viaja através de um meio com um índice de refração n tem um atraso de tempo $dt = nds/c$ e tem uma distância equivalente $cdt = nds$ (SPILKER, 1996).

A diferença entre o atraso do caminho real $S = ct = \int n(s)10^{-6} ds$ e a distância geométrica ρ é o T. A diferença entre o índice de refração real e a unidade é da ordem de grandeza de $n - 1 \cong 2,7 \times 10^4$ ao nível do mar, e varia com a altitude, latitude e várias condições meteorológicas. Assim, o caminho real do satélite ao usuário é um caminho ligeiramente curvado. Nas frequências das bandas dos sinais GNSS, o índice de refração tem frequência constante, portanto, não é dispersivo; isto é, $\frac{dn}{df} = 0$, assim sendo, a velocidade do grupo e a velocidade da fase são as mesmas (SPILKER, 1996).

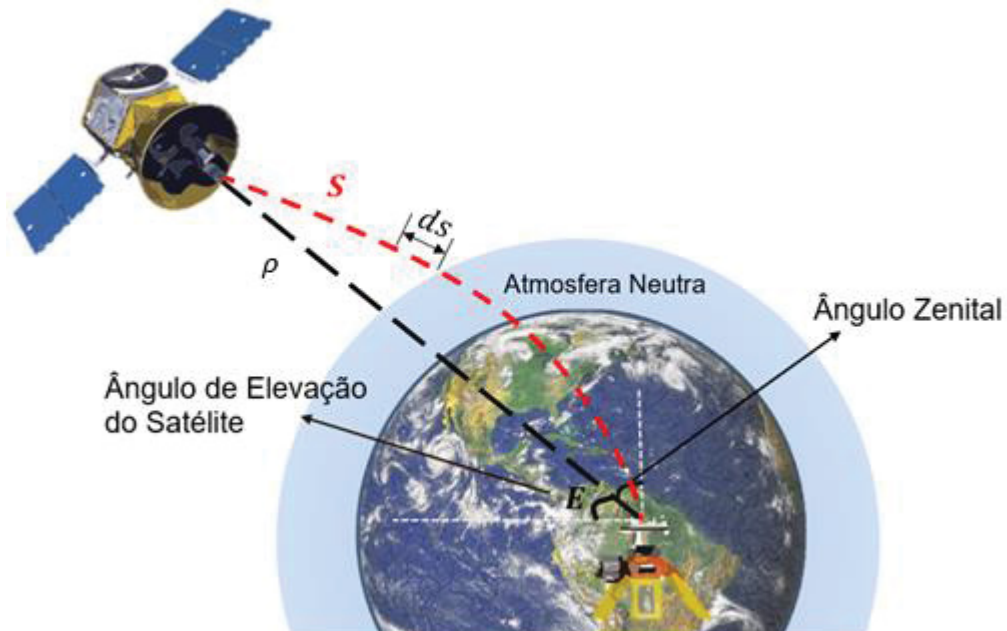
O comprimento real do caminho, em metros, é:

$$S = \int n(s) ds. \quad (34)$$

Quando o índice de refração for maior que a unidade ($n > 1$), as ondas eletromagnéticas se propagam mais devagar do que ocorreria no vácuo, ou seja, sofrem um atraso. Quando o índice de refração é contínuo, a trajetória real dos raios é o caminho que minimiza o atraso total, o que faz com que o caminho do raio seja curvado, bem como é conhecido do princípio de Fermat. Dessa forma, o caminho curvo, embora fisicamente um pouco mais longo, tem um atraso total um pouco menor do que um caminho viajando em linha reta através da troposfera. O caminho real (curvo) prossegue ao longo de um caminho que é inicialmente mais próximo do zênite, de modo que ele passe pela região de alta constante dielétrica mais rapidamente (SPILKER, 1996; SAPUCCI, 2001; GOUVEIA, 2019).

Assim, o comprimento real do caminho curvo S é maior que o comprimento do caminho geométrico da linha reta ρ , em metros, embora seja menor no tempo de atraso (FIGURA 4).

FIGURA 4 - ILUSTRAÇÃO DO EFEITO DA ATMOSFERA NEUTRA NOS SINAIS GNSS



FONTE: Adaptado de Sapucci (2001).

De forma clara, S é maior que a distância geométrica em linha reta ρ (em ângulos de elevação inferiores a 90 graus) que o raio levaria no vácuo. A diferença entre o comprimento real e a distância geométrica em linha reta é (SPILKER, 1996):

$$T = S - \rho = \int n(s)ds - \rho. \quad (35)$$

Assim, considerando os efeitos devido à refração troposférica (seção 2.5), o atraso total é dado pela Equação (36).

$$T = \int (n - 1)ds + \left(\int ds - \rho \right) = \int (n - 1)ds + \left(\int ds - \rho \right) \quad (36)$$

Como n possui valores muito próximos da unidade, Sapucci (2001) afirma ser conveniente expressar o T empregando-se a grandeza refratividade do ar (N).

Dessa forma, o atraso total é dado pela Equação (37):

$$T = (10^{-6}) \int Nds + \left(\int ds - \rho \right), \quad (37)$$

onde $N = (n - 1) * 10^{-6}$ abrange os termos hidrostático e não hidrostático; e $(\int ds - \rho)$ representa o atraso geométrico Δ .

O atraso inclinado total (Equação (38)) será a soma do caminho do raio percorrido, entre satélite transmissor (j) e receptor (r), e o atraso geométrico (Δg), e pode ser aproximado como a soma dos efeitos dos atrasos hidrostático e não hidrostático (MONICO, 2008; SPILKER, 1996):

$$T = (10^{-6}) \int_r^j Nds + \Delta g = (10^{-6}) \int_r^j N_h ds + (10^{-6}) \int_r^j N_w ds + \Delta g. \quad (38)$$

Portanto, o atraso total é composto por três componentes: o atraso hidrostático (primeiro termo), o atraso não hidrostático (segundo termo), e o efeito de curvatura (Δg), o qual faz com que o sinal percorra um caminho mais longo, ainda que mais rápido, que o caminho do raio em linha reta (TEUNISSEN e MONTENBRUCK, 2017; SAPUCCI, 2001; NIEVINSKI, 2009; GOUVEIA, 2019).

Os sinais GNSS percorrem diferentes direções até o receptor, sendo necessário conhecer os componentes hidrostáticos e não hidrostáticos dessas direções (GOUVEIA, 2019). O atraso na direção inclinada entre o satélite e o receptor é obtido em função do tempo, das coordenadas do receptor e da direção do satélite (ângulo de elevação (E) e azimuth). Esse atraso também pode ser dado na direção zenital (ZTD), cujo ângulo de elevação é o zênite. Nessa direção o fator Δg é nulo (NIEVINSKI, 2009; GOUVEIA, 2019).

O ZTD é calculado por uma função de mapeamento (seção 2.5.3) que é usada juntamente com algum modelo para o atraso do zênite (seção 2.5.2) e, de uma forma simplificada, pode ser estimado pela Equação (39) (SPILKER, 1996):

$$ZTD = [ZHD \cdot m_h(E) + ZWD \cdot m_w(E)], \quad (39)$$

sendo ZHD (*Zenital Hydrostatic Delay*) a componente hidrostática, a qual depende apenas da pressão total, e não da proporção de mistura de ar seco e úmido, e representa aproximadamente 90% do ZTD; e ZWD (*Zenithal Wet Delay*) a componente não hidrostática, que representa em torno de 10% do ZTD, porém, sua variação é bem maior e atinge cerca de 20% em poucas horas, o que torna impossível sua predição com boa precisão (SPILKER, 1996; SAPUCCI, 2001; MONICO, 2008; GOUVEIA, 2019). m_h e m_w são as funções de mapeamento (fator de obliquidade) hidrostático e não hidrostático, respectivamente, que aumentam o ZTD à medida que o ângulo de elevação (E) diminui.

A expressão geral empírica para a refratividade de um gás não ideal, incluindo o vapor d'água é a seguinte (MONICO, 2008):

$$N_T = k_1 \left(\frac{P_h}{T} \right) Z_H^{-1} + k_2 \left(\frac{e}{T} \right) Z_W^{-1} k_3 \left(\frac{e}{T^2} \right) Z_W^{-1}, \quad (40)$$

onde P_h e e são a pressão parcial do ar seco e do vapor d'água (em milibares, respectivamente); T é a temperatura em graus Kelvin; Z_H e Z_W são os fatores de compressibilidade para as componentes hidrostática e não hidrostática; e k_1 , k_2 e k_3 são valores determinados de modo experimental, e equivalem a $77,604 \pm 0,0124$; $64,79 \pm 10$ e 377600 ± 3000 , respectivamente.

Os oito principais constituintes da atmosfera hidrostática são N_2 , O_2 , Ar , CO_2 , Ne , He , Kr e Xe . Utilizando o peso molar desses constituintes, seu volume fracionário, e um desvio padrão representando a variabilidade dos mesmos na atmosfera, encontra-se o peso molar médio de ar seco ($M_H = 28,9644 + 0,0014 \frac{kg}{kmol}$). Onde o desvio padrão é o máximo da variabilidade de M_H , com base nos valores de suas características (peso molar, volume fracionário e desvio padrão) e na suposição de que esses componentes variam independentemente (DAVIS et al., 1985).

Aplicando a lei dos gases, e considerando $M_H = 28,9644 + 0,0014 \frac{kg}{kmol}$, $M_W = 18,0152 \frac{kg}{kmol}$ e $R = 8,31434 \frac{kg}{(kmol K)}$ a Equação (40) fica (SPILKER, 1996):

$$N_T = 22,276\rho + (16,5 \pm 10) \left(\frac{e}{T}\right) Z_W^{-1} + 377600 \left(\frac{e}{T^2}\right) Z_W^{-1}, \quad (41)$$

na qual o primeiro termo representa a componente hidrostática, que possui pequena incerteza (0,014%) e depende apenas da densidade total da atmosfera; e os demais termos representam a componente não hidrostática, que possui uma incerteza significativa em seus coeficientes, e depende da temperatura e da pressão parcial do vapor d'água, os quais são muito variáveis, o que dificulta sua determinação (SPILKER, 1996; MONICO, 2008).

2.5.2 Modelos Troposféricos

Uma medição direta da refratividade ao longo do caminho de propagação do sinal não é viável. Por conta disso, foram desenvolvidos diversos modelos para uma descrição do comportamento da refratividade (HOPFIELD, 1969; SAASTAMOINEN, 1973; SEEBER, 2003; GOUVEIA, 2019). Os tópicos a seguir descrevem os principais modelos utilizados na determinação do atraso zenital troposférico.

2.5.2.1 Modelos empíricos

Os principais modelos empíricos que tratam o atraso zenital troposférico são o de Hopfield (1969) e o de Saastamoinen (1973). Esses modelos utilizam como parâmetros de entrada dados medidos ou previstos de pressão, temperatura e umidade sobre condições atmosféricas médias a partir de uma climatologia, referente a vários anos de observação (superior a 10 anos) (HOPFIELD, 1969; SAASTAMOINEN, 1973; GOUVEIA, 2019).

A principal desvantagem dos modelos empíricos clássicos é que, devido ao reduzido número de estações meteorológicas existentes no hemisfério sul na época do desenvolvimento de tais modelos, os dados utilizados na elaboração dos mesmos concentram-se no hemisfério Norte. Assim, os parâmetros meteorológicos que são considerados nesses modelos podem apresentar grandes diferenças em relação aos do hemisfério Sul, que sofrem bruscas variações devido ao clima tropical. Em especial, tem-se a influência da floresta amazônica, que afeta fortemente os valores de vapor d'água, temperatura e pressão, ao longo de um dia, de acordo com a localidade (SAPUCCI, 2001; DE ABREU *et al.*, 2014; ALVES, *et al.*, 2015).

Tal questão mencionada faz com que esses modelos forneçam resultados de baixa precisão para o território brasileiro, mas seus efeitos podem ser minimizados ao se empregar métodos de ajustamento estimando os resíduos advindos dessa modelagem (GOUVEIA, 2019). Dependendo do nível de precisão requerida, esses modelos ainda podem ser utilizados (SAPUCCI, 2001; GOUVEIA, 2013; DE ABREU *et al.*, 2014; ALVES *et al.*, 2015; TEUNISSEN e MONTENBRUCK, 2017).

O modelo de Hopfield é representado por uma função do 4º grau, dependente da altura, e é expresso pela Equação (42) (SEEBER, 2003):

$$T_r^S = T_{ZH}mH(E) + T_{ZW}mW(E), \quad (42)$$

onde:

$$T_{ZH} = 155,2 \times 10^{-7} \frac{P}{T} H_d, \quad (43)$$

$$T_{ZW} = 155,2 \times 10^{-7} \frac{4810e}{T^2} H_w, \quad (44)$$

$$mH(E) = (\text{sen}(E^2 + 6,25)^{1/2})^{-1}, \quad (45)$$

$$mW(E) = (\text{sen}(E^2 + 2,25)^{1/2})^{-1}, \quad (46)$$

$$H_d = 40136 + 148,72(T - 273,16), \quad (47)$$

$$H_w = 11000m. \quad (48)$$

Os valores de P , T e e são referentes à pressão, temperatura e à pressão parcial do vapor d'água, derivados de uma atmosfera padrão. P e e são dados em hPa, e T é dado em Kelvin. T_r^S descreve o efeito total da refração troposférica na direção do zênite. O ângulo de elevação E é dado em graus. T_{ZH} representa o atraso do zênite hidrostático; T_{ZW} representa o atraso do zênite não hidrostático; e $mH(E)$ e $mW(E)$ são as funções de mapeamento. Os termos H_d e H_w correspondem às alturas das camadas atmosféricas das componentes hidrostática e não hidrostática, respectivamente, em unidades métricas. Sendo o valor H_d dado em função da temperatura, e o valor H_w uma constante.

Já no modelo de Saastamoinen é suposto que haja um decréscimo linear da temperatura até a tropopausa (aproximadamente 12km) e que, acima desta (na estratosfera), a temperatura seja constante, acarretando num modelo isotérmico. Outras suposições desse modelo são que a atmosfera está em equilíbrio hidrostático e que todo o vapor d'água se concentra na troposfera, comportando-se como um gás ideal. Ademais, tal modelo considera que a densidade do ar seja proporcional a

pressão e inversamente proporcional a altitude e a gravidade (SAPUCCI, 2001; MONICO, 2008). O modelo de Saastamoinen é expresso por (SPILKER, 1996):

$$T_r^s = 0,002277(1 + D)^{-1} \sec z \left[P + \left(\frac{1255}{T} + 0,05 \right) e - B \tan^2 z \right] + \partial_R, \quad (49)$$

onde B e ∂_R são fatores de correção e $z = 90^\circ - E$ e $D = 0,0026 \cos 2\phi + 0,00028H$; e ϕ é a latitude do lugar e H é a altitude ortométrica em km.

Está implícito no termo 0,002277 os valores da constante k_1 , constante específica dos gases hidrostático (R_h).

$$\begin{aligned} P &= P_r ((1 - 0,000226(H - H_r))^{5,225}, \\ T &= T_r - 0,0065(H - H_r), \\ H_u &= H_{u_r} e^{-0,0006396(H - H_r)}, \end{aligned} \quad (50)$$

sendo P_r, T_r e H_{u_r} os valores de referência para pressão, temperatura e umidade na altura de referência H_r .

2.5.2.2 Modelo de PNT CPTEC/INPE

Devido ao fato dos modelos empíricos de correção troposférica utilizarem em sua modelagem dados de estações concentradas no hemisfério Norte, não sendo ideais para regiões localizadas no hemisfério Sul, as previsões dos valores do ZTD, geradas por modelos de Previsão Numérica de Tempo (PNT), estão sendo cada vez mais investigadas e avaliadas pela comunidade científica (SAPUCCI *et al.*, 2006; GOUVEIA, 2013; ALVES *et al.*, 2015; GOUVEIA, 2019).

Um modelo de PNT é uma malha que contém informações sobre previsões de dados meteorológicos como: temperatura, pressão e umidade (ponto de orvalho), para diversos níveis verticais, desse modo, considera as variações climáticas regionais e temporais. Essas informações podem ser utilizadas para estimar a distribuição espacial de ZTD, nos mesmos intervalos de tempo em que o modelo numérico gera as previsões. Podem ser estimados valores de ZTD para todos os pontos de uma grade, obtendo-se assim uma malha, que pode ser interpolada para gerar previsões de ZTD em qualquer outro ponto dentro dessa grade (CPTEC, 2017). A PNT utiliza o princípio de que, conhecendo-se as leis de evolução do estado da atmosfera, pode-se calcular o seu estado futuro no instante t , contanto que seja conhecido o seu estado inicial no instante t_0 (RICHARDSON, 1922 apud SAPUCCI, 2006).

Os valores previstos de ZWD podem ser obtidos ao aplicar os perfis de temperatura e razão de mistura, fornecidos pelo modelo de PNT. As previsões do ZHD são obtidas utilizando os valores de pressão atmosférica na superfície, também previstos pelo modelo, e as coordenadas do ponto. Somando os valores de ZWD e ZHD obtêm-se as previsões do ZTD para esse ponto. Fazendo-se isso para todos os pontos da grade do modelo, obtém-se uma malha de informações que contém a distribuição espacial dessa variável. Interpolando essa malha, é possível obter estimativas do ZTD para qualquer outro ponto na abrangência da grade e, a partir desses valores, analisar a variabilidade sazonal dessa quantidade na América do Sul (SAPUCCI, 2006; GOUVEIA, 2019).

A precisão com que a atmosfera é modelada e definida no instante t_0 está intrinsicamente relacionada à qualidade das previsões futuras. As leis da mecânica e da termodinâmica são empregadas para a água e o ar presentes na atmosfera. Desse modo, também são considerados a influência do sistema climático, a esfericidade da Terra, os raios solares, o relevo, os oceanos, a vegetação, etc (DE OLIVEIRA, 2013).

Entretanto, a complexidade dos modelos para a obtenção das previsões é elevada e exige alta capacidade computacional (SAPUCCI, 2006). À vista disso, o CPTEC adquiriu um novo supercomputador (CRAY XT6), através do qual será possível melhorar a resolução espacial dos modelos de previsão de tempo, de clima sazonal, ambiental (qualidade do ar) e de projeções de cenários de mudanças climáticas (CPTEC, 2017).

Em 2012, o Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), disponibilizou uma versão da modelagem de PNT denominada Eta15km, com resolução horizontal de 15 km e 22 níveis verticais. Esse modelo fornecia previsões de dados meteorológicos num intervalo temporal de três horas, sendo oito previsões por dia. Para as regiões da América do Sul, essa modelagem encontrava-se operacional no CPTEC/INPE, e era disponibilizada em: <http://satelite.cptec.inpe.br/htmldocs/ztd/zenital.htm> (SAPUCCI et al, 2006; DE ABREU *et al.*, 2014). Porém, atualmente o produto não está operacional, pois está sendo atualizado para o novo modelo de PNT, o *Weather Research and Forecasting* (WRF), que se encontra em fase de testes e consolidação.

O WRF é um modelo de PNT que possui um sistema de assimilação de dados próprio, o *Weather Research and Forecasting model Data Assimilation* (WRFDA), capaz de produzir condições iniciais do modelo de previsão (GOUVEIA, 2019). Esse modelo é utilizado em centros operacionais de previsão de tempo e em pesquisas para o estudo da atmosfera. Seu sistema de assimilação de dados pode ser alimentado por uma série de tipos de observações a fim de encontrar as condições iniciais ideais, possibilitando-o reproduzir a estrutura termo-hidrodinâmica da atmosfera com boa precisão (SKAMAROCK *et al.*, 2008; GOUVEIA, 2019).

O WRF tornou-se operacional no CPTEC/INPE em 01 de agosto de 2018, para a América do Sul. Ele pode ser configurado para uma região específica, por meio de parametrizações físicas da atmosfera, o que o torna um modelo regional. A versão operacional das previsões do WRF regional tem resolução horizontal de 5 km (0,045°), vertical de 25 níveis e temporal de 1h (previsão de até 72 horas) as quais são obtidas a partir de duas análises diárias (00h e 12h UTC) (SKAMAROCK *et al.*, 2008; GOUVEIA, 2019). Esse novo produto é disponibilizado em http://ftp1.cptec.inpe.br/modelos/tempo/WRF/ams_05km/brutos.

Alves *et al.*, (2015) avaliaram o impacto do modelo de PNT regional do CPTEC/INPE no ZTD (Eta15), em relação ao modelo empírico de Hopfield, no PPP, em cinco estações da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC), com diferentes características troposféricas, durante o período de junho de 2012 a dezembro de 2013. Os autores verificaram que o modelo Eta15 apresenta resultados superiores ao modelo de Hopfield.

Os referidos autores verificaram que, com o modelo Eta15, os valores de RMS ficaram inferiores a 10 cm, em 24 horas de dados, para todas as estações. Já com o modelo de Hopfield, os valores de RMS ficaram em torno de 60 cm para o mesmo tempo de observação. Dessa forma, os autores concluíram que é possível empregar o modelo de PNT em vez de modelos empíricos para obter posicionamento GNSS com maior acurácia. Ademais, as melhorias mais significativas com o modelo de PNT, aproximadamente um fator de 3 para a componente planialtimétrica, ocorreram nas regiões de alta umidade, que incluem a estação SAGA da RBMC.

2.5.2.3 Estimativa do ZTD

No que se refere à Estimativa do ZTD, a mesma é realizada a partir do cálculo do ZHD, utilizando-se um modelo empírico, e a estimativa de ZWD ou de ZTD com posterior subtração do ZHD. No RTKLIB v.2.4.2, o ZHD é obtido utilizando-se o modelo Saastamoinen (seção 2.5.2.1) com o ângulo zenital $z = 0$ e a umidade relativa $h_{rel} = 0$. Para a função de mapeamento, o RTKLIB v.2.4.2 emprega a NMF (Função de mapeamento de Niell), que será abordada na seção 2.5.3.5, como padrão. O ZTD é estimado como parâmetro desconhecido no processo de estimativa dos parâmetros.

Dentro deste contexto, uma questão muito importante no ajustamento de observações é a característica de alta correlação (maior que 70%) dos valores de ZWD/ZTD estimados com os valores também estimados de componente altimétrica do posicionamento e de erro de relógio do receptor (ROTHACHER; BEUTLER, 2002; AHN, 2016; HADAS *et al.*, 2016). De acordo com Rothacher (2002), os valores de coeficiente de correlação tendem a aumentar (acima de 90%) a partir de 20° de ângulo de elevação do sinal recebido. Fund *et al.*, (2012), por exemplo, comprovaram isso para experimentos de PPP com RA ao redor de todo o mundo.

A fim de propor soluções para contornar estes problemas de alta correlação, muitas pesquisas foram desenvolvidas, tanto para o caso de posicionamento com solução pós-processada quanto para o posicionamento com solução em tempo-real. No caso pós-processado, é comumente aceito estimar os valores de ZWD ou ZTD a partir de um processo estocástico conhecido como “Caminho Aleatório” (*Random Walk*). No caso do PPP, Kouba e Heroux (2001) recomendaram este processo assumindo o valor de assinatura de 5 mm/ \sqrt{h} para estimativa do ZWD. No software RTKLIB 2.4.2 é utilizado este processo. Uma alternativa é a aplicação de injunção relativa, como indicado por Dach *et al.*, (2015) e Pacione *et al.*, (2009).

Outra questão é a relacionada ao tempo de rastreo. De acordo com Rothacher e Beutler (2002), a estimativa do ZTD é problemática quando observadas sessões curtas, pois a decorrelação entre os valores de ZTD e da componente altimétrica requer uma sessão longa de pelo menos uma hora. Ahn (2016) avaliou intervalos de tempo de rastreo menores que uma hora e confirmou a questão indicada. Outra estratégia para ajudar na decorrelação é considerar a diminuição do

valor de máscara de elevação o tanto quanto possível, conforme indicado por Rothacher (2002).

Outra questão relevante é que há um tempo de convergência para os valores de ZWD ou ZTD no ajustamento sequencial, assim como no caso dos demais parâmetros. Especificamente para o caso do PPP com RA, Shi e Gao (2012) indicam que a busca pela RA no PPP não permite a convergência do parâmetro troposférico de forma imediata. Ao invés disso, somente após os parâmetros de ambiguidade serem fixados em seus valores inteiros é que a convergência do parâmetro troposférico é acelerada. Os mesmos autores indicam ainda que a convergência do parâmetro troposférico é de fato dominada pelo ambiente real no local de observação e que é comum que a convergência da troposfera exija um tempo considerável, por exemplo, mais de uma hora. Como resultado, o erro residual da refração troposférica degrada outros parâmetros desconhecidos, especialmente a coordenada altimétrica.

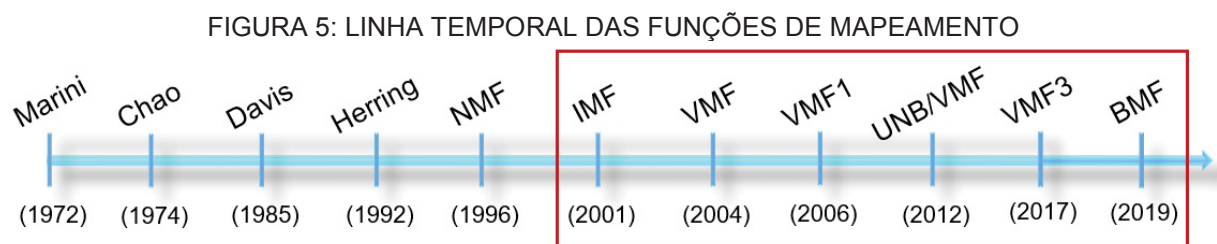
Em Shi e Gao (2013) pode ser verificada a proposição de um método que baseado na aplicação de dados externos da troposfera para calibrar o atraso zenital a priori. Devido à alta precisão dos dados de entrada, o atraso residual da troposfera pode, portanto, ser injuncionado de forma relativa com um pequeno desvio padrão inicial. Posteriormente, pode-se esperar que a solução de altitude obtida após a RA no PPP seja aprimorada devido à correlação reduzida entre os parâmetros da troposfera e a mesma.

Outra questão é com relação ao limiar de consideração de convergência. Por exemplo, em Pan e Guo (2018), para o PPP, as convergências foram consideradas alcançadas após dez épocas consecutivas nas quais os desvios-padrão em ZTD se apresentaram menores que 20 mm.

2.5.3 FUNÇÕES DE MAPEAMENTO

Como visto na Equação (39), o ZTD depende do índice de refração ao longo do caminho real percorrido pelo sinal GNSS. Para uma atmosfera que é azimutalmente simétrica em relação à antena receptora, este atraso depende apenas do perfil vertical da atmosfera e do ângulo de elevação da fonte de rádio. A função que descreve a dependência do ângulo de elevação do atraso atmosférico tornou-se conhecida como função de mapeamento (DAVIS *et al.*, 1985; NIELL,

1996). Ela é usada juntamente com algum modelo para obter o valor do ZTD em qualquer ângulo de elevação (E) que o satélite esteja em relação ao receptor (SAPUCCI, 2001; GOUVEIA, 2013; MARQUES *et al.*, 2014). Para ângulos de elevação acima de 5° há diversas funções de mapeamento que produzem resultados satisfatórios (FIGURA 5). As funções em destaque são as que foram modeladas com base em dados de PNT.

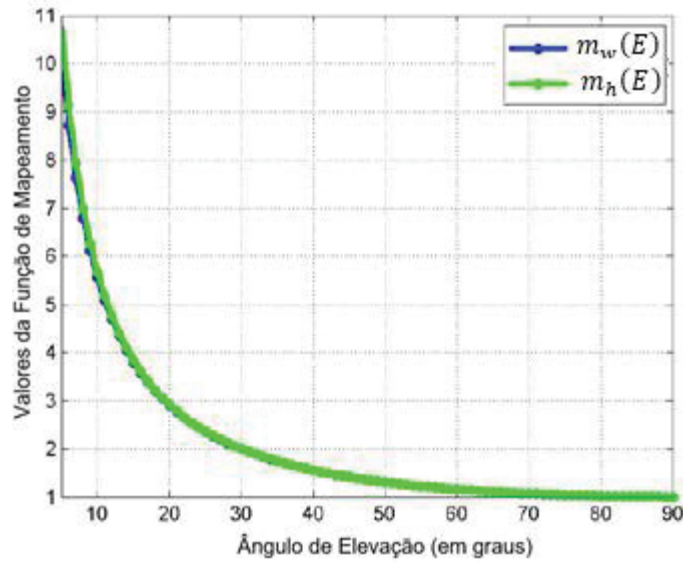


FONTE: Adaptado de Gouveia (2019).

A função de Marini (1972) foi a primeira desenvolvida, adequada para os fins geodésicos. Com base nela as demais funções de mapeamento foram desenvolvidas e aprimoradas, a fim de alcançar melhor qualidade na determinação do atraso troposférico (DAVIS, 1985; NIELL, 1996; SANTOS *et al.*, 2012; GOUVEIA, 2019). Um exemplo da relação entre os valores da função de mapeamento com o ângulo de elevação do satélite é apresentado por Wang (2014) (FIGURA 6), que compara os valores da função de mapeamento de Niell com o ângulo de elevação do satélite.

Na FIGURA 6 pode-se observar que os valores da função de mapeamento das componentes hidrostática (m_h) e não hidrostática (m_w) estão aumentando exponencialmente, à medida que o ângulo de elevação do satélite (E) diminui.

FIGURA 6 – VALORES DA FUNÇÃO DE MAPEAMENTO DAS COMPONENTES HIDROSTÁTICA E NÃO HIDROSTÁTICA DE NIELL EM FUNÇÃO DO ÂNGULO DE ELEVAÇÃO DO SATÉLITE



FONTE: Adaptado de Wang (2014).

2.5.3.1 Função de mapeamento de Marini

A função de mapeamento mais simples foi definida com base na lei da cossecante (“Lei de Snell-Descartes”), a qual considera a Terra sendo plana e a refratividade constante ao longo de uma camada atmosférica. Para ângulos de elevação próximos a 90 graus, essa simples aproximação $1/\text{sen}(E)$ é geralmente suficiente. No entanto, em ângulos de elevação mais baixos ($< 20 \text{ graus}$) e para aplicações que requeiram maior acurácia, essa função não é inadequada, uma vez que pode causar erro de cerca de 2cm no valor do atraso (SPILKER, 1996; GOUVEIA, 2019).

Buscando melhor acurácia na modelagem de (ZTD), Marini (1972) descreveu uma versão de fração continuada da função de mapeamento (Equação (51)) (DAVIS, 1985; SPILKER, 1996):

$$m(E) = \frac{1}{\text{sen}(E) + \frac{a}{\text{sen}(E) + \frac{b}{\text{sen}(E) + \frac{c}{\text{sen}(E) + \dots}}}}, \quad (51)$$

onde a , b e c são constantes, e podem ser usadas para aproximar a dependência do ângulo de elevação do atraso atmosférico.

2.5.3.2 Função de mapeamento de Chao

Chao empregou um modelo de funções de mapeamento da mesma forma que a representação de fração continuada, exceto que, neste caso, há duas funções de mapeamento, uma para a componente hidrostática e outra para a componente não hidrostática. Além disso, o segundo $\text{sen}(\varepsilon)$ foi substituído por $\tan(\varepsilon)$ para garantir assim que $m(90^\circ) = 1$ (DAVIS, 1985; SPILKER, 1996).

As funções de mapeamento usadas por Chao são as seguintes:

$$\begin{aligned} m_H(E) &= \frac{1}{\text{sen}(E) + \frac{0,00143}{\tan(E) + 0,0445}}, \\ m_W(E) &= \frac{1}{\text{sen}(E) + \frac{0,00035}{\tan(E) + 0,017}}. \end{aligned} \quad (52)$$

2.5.3.3 Função de mapeamento de Davis

Davis (1985) desenvolveu uma função mais sofisticada, com base no modelo de Chao, para melhorar a precisão da modelagem para ângulos de baixa elevação. Nessa função, os coeficientes a , b e c dependem das pressões de superfície, da temperatura, da taxa de variação da temperatura troposférica e da altura da tropopausa. A umidade relativa foi considerada constante até 11 km e zero acima dessa altura, e a pressão total foi considerada dependente do equilíbrio hidrostático (SPILKER, 1996).

Essa representação foi comparada com os resultados do *ray-tracing* e foi encontrada com precisão de cerca de 2,5 cm, mesmo para ângulos de elevação de 5 graus. Este modelo é denominado função de mapeamento Davis CFA-2.2, e é a seguinte (SPILKER, 1996):

$$m(E) = \frac{1}{\text{sen}(E) + \frac{a}{\tan(E) + \frac{b}{\tan(E) + c}}}, \quad (53)$$

onde os termos a , b e c dependem de medições ou estimativas (DAVIS, 1985):

$$\begin{aligned} a &= 0,001185[1 + 0,6071 \times 10^{-4}(P_o - 1000) - 0,1471 \times 10^{-3}e_o \\ &\quad + 0,3072 \times 10^{-2}(T_o - 20) + 0,1965 \times 10^{-1}(\beta + 6,5) \\ &\quad - 0,5645 \times 10^{-2}(H_T - 11,231)], \end{aligned} \quad (54)$$

$$\begin{aligned}
b = & 0,001144[1 + 0,1164 \times 10^{-4}(P_o - 1000) - 2,2795 \times 10^{-3}e_o \\
& + 0,3109 \times 10^{-2}(T_o - 20) + 0,3038 \times 10^{-1}(\beta + 6,5) \\
& - 0,1217 \times 10^{-2}(H_T - 11,231)], \\
c = & -0,0090.
\end{aligned}$$

sendo P_o é a pressão total da superfície em milibares; e_o é a pressão parcial do vapor d'água na superfície em milibares; T_o é a temperatura da superfície em graus Celsius; β é a taxa de variação da temperatura troposférica em K/km; e H_T é a altura da tropopausa em km.

2.5.3.4 Função de mapeamento de Herring

A função de mapeamento de Herring (1992) foi desenvolvida baseando-se na fórmula do atraso zenital hidrostático de Saastamoinen (1972) e na fração continuada da função de mapeamento do atraso troposférico de Marini (1972). Essa função considera os efeitos dos gradientes lineares na temperatura e pressão no atraso troposférico, fornecendo expressões para as funções de mapeamento hidrostático e úmido. Tais funções são determinadas a partir da técnica traçado de raios, através de dados brutos de radiossondas para as medidas dos perfis verticais da temperatura e do vapor d'água, assumindo uma atmosfera em equilíbrio hidrostático para determinar a pressão.

2.5.3.5 Função de mapeamento de Niell

A função de mapeamento de Niell (1996) foi desenvolvida a partir da função de Marini com três coeficientes, mas normalizada para gerar a unidade no zênite, a fim de que, assim como a função de mapeamento de Chao, $m(90^\circ) = 1$ (SAPUCCI, 2001).

Niell (1996) desenvolveu sua função utilizando dados de radiossonda em uma ampla faixa de latitudes. Sendo seus parâmetros de entrada a altura da estação, a atitude da estação e o dia do ano (BOEHM e SCHUH, 2004). A função de mapeamento de Niell é dada pelas seguintes equações (Niell, 1996):

$$\begin{aligned}
m_H(E) = & \frac{1 + \frac{a_N}{1 + \frac{b_N}{1 + c_N}}}{\text{sen}(E) + \frac{a_N}{\text{sen}(E) + \frac{b_N}{\text{sen}(E) + c_N}}} \\
& + \left(\frac{1}{\text{sen}(E)} - \frac{1 + \frac{a_{h_t}}{1 + \frac{b_{h_t}}{1 + c_{h_t}}}}{\text{sen}(E) + \frac{a_{h_t}}{\text{sen}(E) + \frac{b_{h_t}}{\text{sen}(E) + c_{h_t}}}} \right) H \\
& \times 10^{-3}, \\
m_W(E) = & \frac{1 + \frac{a_N}{1 + \frac{b_N}{1 + c_N}}}{\text{sen}(E) + \frac{a_N}{\text{sen}(E) + \frac{b_N}{\text{sen}(E) + c_N}}}.
\end{aligned} \tag{55}$$

onde a_{h_t} , b_{h_t} e c_{h_t} são os valores ajustados pelo MMQ para a correção de altitude; e correspondem a $2,53 \times 10^{-5}$; $5,49 \times 10^{-3}$; e $1,14 \times 10^{-3}$, respectivamente; H é a altitude das estações em relação ao nível médio do mar.

Os coeficientes a_N , b_N e c_N diferente das outras funções, não dependem da temperatura superficial e estão em função da localização geográfica e das mudanças sazonais. Dessa forma, a função de mapeamento de Niell torna-se melhor que as anteriores, pois sua modelagem não apresenta alguns dos problemas encontrados devido a utilização da temperatura (SAPUCCI, 2001).

Na estimativa dos coeficientes da função de mapeamento de Niell, utilizou-se dados de radiossondas de 26 estações distribuídas globalmente. A partir de algumas simplificações, foi feito um ajustamento desses dados, abrangendo as latitudes 74° Norte até 42° Sul. Sendo a região equatorial descrita por valores de latitude igual a 15° Norte, e a região polar descrita por valores de latitude 75° Norte. No ajustamento foi suposto que as condições atmosféricas no hemisfério Norte e sul apresentam o mesmo comportamento em relação às estações do ano (SAPUCCI, 2001).

Para a componente hidrostática, estimou-se valores que se referem à média e à amplitude para os coeficientes a_N , b_N e c_N nas latitudes 15° , 30° , 45° , 60° e 75° (TABELA 2). Para uma latitude qualquer, esses coeficientes podem ser obtidos por uma interpolação linear entre os valores mais próximos tabelados.

TABELA 2 – COEFICIENTES DA FUNÇÃO DE MAPEAMENTO HIDROSTÁTICA

Coeficientes	Latitude				
	15°	30°	45°	60°	75°
	Média				
a_N	$1,2769934 \times 10^{-3}$	$1,2683230 \times 10^{-3}$	$1,2465397 \times 10^{-3}$	$1,2196049 \times 10^{-3}$	$1,2045996 \times 10^{-3}$
b_N	$2,9153695 \times 10^{-3}$	$2,9152299 \times 10^{-3}$	$2,9288445 \times 10^{-3}$	$2,9022565 \times 10^{-3}$	$2,9024912 \times 10^{-3}$
c_N	$62,610505 \times 10^{-3}$	$62,837393 \times 10^{-3}$	$63,721774 \times 10^{-3}$	$63,824265 \times 10^{-3}$	$64,258455 \times 10^{-3}$
	Amplitude				
a_N	0,0	$1,2709626 \times 10^{-5}$	$2,6523662 \times 10^{-5}$	$3,4000452 \times 10^{-5}$	$4,1202191 \times 10^{-5}$
b_N	0,0	$2,1414979 \times 10^{-5}$	$3,0160779 \times 10^{-5}$	$7,2562722 \times 10^{-5}$	$11,723375 \times 10^{-5}$
c_N	0,0	$9,0128400 \times 10^{-5}$	$4,3497037 \times 10^{-5}$	$84,795348 \times 10^{-5}$	$170,37206 \times 10^{-5}$

FONTE: Adaptado de Sapucci (2001).

Após isso, pode-se determiná-los para a função de mapeamento da componente hidrostática em uma época d , dada em dias do ano, aplicando esses valores na Equação (56) (SAPPUCI, 2001):

$$\begin{aligned}
 a_N(\varphi, d) &= a_{N_{med}}(\varphi) + a_{N_{amp}}(\varphi) \cos\left(2\pi \frac{d - 28}{365,25}\right), \\
 b_N(\varphi, d) &= b_{N_{med}}(\varphi) + b_{N_{amp}}(\varphi) \cos\left(2\pi \frac{d - 28}{365,25}\right), \\
 c_N(\varphi, d) &= c_{N_{med}}(\varphi) + c_{N_{amp}}(\varphi) \cos\left(2\pi \frac{d - 28}{365,25}\right),
 \end{aligned} \tag{56}$$

Já para a componente úmida, utilizou-se apenas o valor médio destes coeficientes nas mesmas latitudes. Sendo necessária apenas uma interpolação em latitude, a partir dos dados da TABELA 3, para cada parâmetro (SAPUCCI, 2001).

TABELA 3 – COEFICIENTES DA FUNÇÃO DE MAPEAMENTO DA COMPONENTE ÚMIDA

Coeficientes	Latitude				
	15°	30°	45°	60°	75°
a_N	$5,8021897 \times 10^{-4}$	$5,6794847 \times 10^{-4}$	$5,8118019 \times 10^{-4}$	$5,9727542 \times 10^{-4}$	$6,1641693 \times 10^{-4}$
b_N	$1,4275268 \times 10^{-3}$	$1,5138625 \times 10^{-3}$	$1,4572752 \times 10^{-3}$	$1,5007428 \times 10^{-3}$	$1,7599082 \times 10^{-3}$
c_N	$4,3472961 \times 10^{-2}$	$4,6729510 \times 10^{-2}$	$4,3908931 \times 10^{-2}$	$4,4626982 \times 10^{-2}$	$5,4736038 \times 10^{-2}$

FONTE: Adaptado de Sapucci (2001).

A função de mapeamento de Niell é bastante utilizada nas técnicas de posicionamento de alta precisão, pois apresenta os melhores resultados se comparada com as funções de mapeamento anteriores e dados de radiossondagens (SAPPUCI, 2001).

2.5.3.6 Funções de Mapeamento Baseadas na PNT

Nos últimos anos, têm-se estudado bastante a utilização de modelos de previsão numérica de tempo para melhorar as funções de mapeamento que são usadas na modelagem de atrasos troposféricos, em análises de dados de VLBI e GNSS (BOEHM e SCHUH, 2004). Um exemplo disso é Niell (2001), que propôs a Função de Mapeamento Isobárica (IMF), que aplica como parâmetros de entrada a altura do nível de pressão de 200 mbar (z_{200}) e a relação entre o atraso úmido ao longo de uma linha reta a $3,3^\circ$ de elevação e seu atraso no zênite ($smfw3$).

A Função de mapeamento de Viena (VMF) foi elaborada por Boehm e Schuh (2004), e também é baseada na forma de fração continuada de Marini. A idéia principal da VMF é usar o *ray-tracing* através do NWM diretamente ao invés de usar parâmetros intermediários como z_{200} e $smfw3$ de Niell (2001). A VMF para a função de mapeamento hidrostático e úmido é expressa por (BOEHM e SCHUH, 2004):

$$m_f(E) = \frac{1 + \frac{a}{1 + \frac{b}{1 + c}}}{\sin(E) + \frac{\frac{b}{\sin(E) + c}}{\sin(E) + c}}. \quad (57)$$

A VMF utiliza os dados do nível de pressão do ECMWF para determinar seus coeficientes. Os coeficientes b e c são determinados empiricamente a partir da IMF (*Isobaric Mapping Function*), a qual foi a primeira função de mapeamento baseada em dados de PNT. Já o coeficiente a é determinado pela técnica *ray-tracing* (BOEHM e SCHUH, 2004).

O *ray-tracing* é uma técnica de aproximação gráfica ou matemática, utilizada para quantificar o ZTD supondo que o sinal eletromagnético seja um raio, o qual obedece às leis de reflexão e refração e pode ser determinado por meio de um modelo troposférico (NIEVINSKI, 2009). Tem como parâmetros de entrada o ângulo de elevação inicial, a altura da estação, a temperatura e a pressão do vapor d'água em diferentes níveis da atmosfera neutra. A troposfera é considerada simétrica ao redor das estações (BOEHM e SCHUH, 2004). Esta técnica tem sido frequentemente aplicada no desenvolvimento e na validação de funções de mapeamento (BOEHM e SCHUH, 2004). Uma descrição do *ray-tracing* pode ser encontrada em Boehm e Schuh (2004) e NIEVINSKI (2009).

Essa técnica permite descrever o caminho percorrido pelo sinal GNSS a partir dos efeitos dos parâmetros meteorológicos da atmosfera neutra, representando esse sinal por meio de um raio. Somando-se os raios traçados entre o satélite e o receptor, pode-se modelar o caminho percorrido por esse sinal (GOUVEIA, 2019).

No QUADRO 3 é apresentada uma comparação dos parâmetros de entrada para as funções de mapeamento Niell, IMF e VMF, nas componentes hidrostática e não hidrostática.

QUADRO 3 – COMPARAÇÃO DOS PARÂMETROS DE ENTRADA PARA AS FUNÇÕES DE MAPEAMENTO NIELL, IMF E VMF

	NMF	IMF	VMF
hidrostática	d, h, ϕ	z200, h, ϕ	h, a, b, c
não hidrostática	ϕ	smfw3, h	a, b, c

FONTE: Adaptado de BOEHM e SCHUH (2004).

No Quadro, ϕ é a latitude da estação; h é a altura da estação; e d é o dia do ano.

Devido às deficiências apresentadas pelos coeficientes *b* e *c*, desenvolvidos para a VMF no ECMWF, nas regiões próximas ao Equador e latitudes elevadas, a VMF foi atualizada para a VMF1, através do desenvolvimento de novos coeficientes *b* e *c*, ajustados por mínimos quadrados (DE OLIVEIRA, 2013). Os valores de *a*, das componentes hidrostática e não hidrostática da VMF1, são fornecidos em uma grade global de 2,5 graus de longitude x 2,0 graus de latitude. Os parâmetros são disponibilizados em um intervalo temporal de 6 horas, nos arquivos de 0, 6, 12 e 24 horas, armazenados em listas anuais (DE OLIVEIRA, 2013). A VMF1 provê os resultados geodésicos com maior precisão, quando comparada com a NMF e a IMF (BOEHM e SCHUH, 2004).

Uma nova abordagem destinada a refinar a função de mapeamento mais importante atualmente, a VMF1, são as chamadas Funções de Mapeamento de Viena 3 (VMF3). Essa função foi elaborada visando eliminar as deficiências nos coeficientes empíricos *b* e *c*, e apresenta maior precisão do que a VMF1, em particular em ângulos de elevação abaixo de 3° (LANDSKRON e BOHEM, 2018).

Ademais, tem-se o modelo da *University of New Brunswick – Canadá* (UNB-VMF1), elaborado por Santos *et al.*, (2012). O UNB-VMF1 baseia-se na VMF1, diferindo apenas nos algoritmos da técnica *ray-tracing* e nos dados de entrada, os quais são das re-análises do *National Center for Environmental Prediction* (NCEP) do *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA). As funções VMF1 e UNB-VMF1 apresentam resultados similares (BOEHM *et al.*, 2011; GOUVEIA, 2019).

No que concerne ao território brasileiro, tem-se a Função de Mapeamento Brasileira (BMF - *Brazilian Mapping Function*) (GOUVEIA, 2019), a qual é gerada a partir dos dados do novo modelo de PNT CPTEC/INPE, o WRF. Esses dados levam em consideração as variações atmosféricas do território brasileiro, com alta resolução espacial e temporal, o que propicia a melhor qualidade no posicionamento de alta acurácia, seja no modo pós-processado ou em tempo real. A BMF apresenta resultados promissores para o território brasileiro. Mais detalhes sobre a BMF podem ser obtidos em Gouveia (2019).

3 MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo são descritos os materiais e métodos que foram empregados para a realização desta pesquisa. Os procedimentos foram divididos em 4 etapas. A etapa 1 abrange a definição das características para a efetivação dos experimentos e a escolha dos locais de estudo. Na etapa 2 tem-se os processos realizados na inclusão de uma ferramenta no RTKLIB v. 2.4.2 para importação dos dados do modelo de PNT CPTEC/INPE e um posterior uso destes para a correção da refração troposférica. Na etapa 3 foram definidos os procedimentos necessários nos processamentos e análise dos dados. Por fim, tem-se na etapa 4 as transformações de coordenadas, compatibilização de SRT e de época, e os cálculos das acurácias para cada experimento.

3.1 MATERIAIS

Dados

- Dados de radiossondas disponibilizados pela Universidade de Wyoming dos Estados Unidos da América, obtidos em: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>;
- Dados de climatologia do CPTEC/INPE, obtidos no endereço eletrônico: <http://infoclima1.cptec.inpe.br/#>;
- Arquivos RINEX das estações de estudo (observação e navegação) da RBMC;
- Efemérides precisas (.sp3), através do *Crustal Dynamics Data Information System* (CDDIS) da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) (<ftp://cddis.nasa.gov/gnss/products/>);
- Arquivos de correção do relógio do satélite (.grg) fornecidos de forma gratuita pelo centro de análises do Centro Nacional de Estudos Espaciais (CNES – do francês *Centre national d'études spatiales*);
- Arquivos de correção de antena (ANTEX) (.atx), pelo *National Geodetic Survey* (NGS), obtidos em: <https://geodesy.noaa.gov/ANTCAL/>;
- Arquivos de carga oceânica (blq) recomendados pelo IERS, modelo FES2004, no endereço eletrônico: <http://holt.oso.chalmers.se/loading/>;

- Arquivos DCB (*Differential Code Bias*) (.DCB), disponibilizados mensalmente pelo Centro para Determinação de Órbitas na Europa (CODE - do inglês *Center for Orbit Determination in Europe*);
- Arquivos finais dos parâmetros de rotação da Terra (.erp), fornecidos pelo CDDIS da NASA;
- Dados de ZHD e ZWD do modelo de PNT CPTEC/INPE, obtidos junto ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da Universidade Estadual Paulista (UNESP), através da doutoranda Tayná Aparecida Ferreira Gouveia.

Softwares

- Software Matlab R2017b;
- Software RTKLIB v. 2.4.2;
- Sistema Operacional: Linux Ubuntu 16.04 LTS;
- Sistema Operacional: Windows 10.

3.2 ETAPA 1: DEFINIÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO, DOS EXPERIMENTOS E SUAS CARACTERÍSTICAS

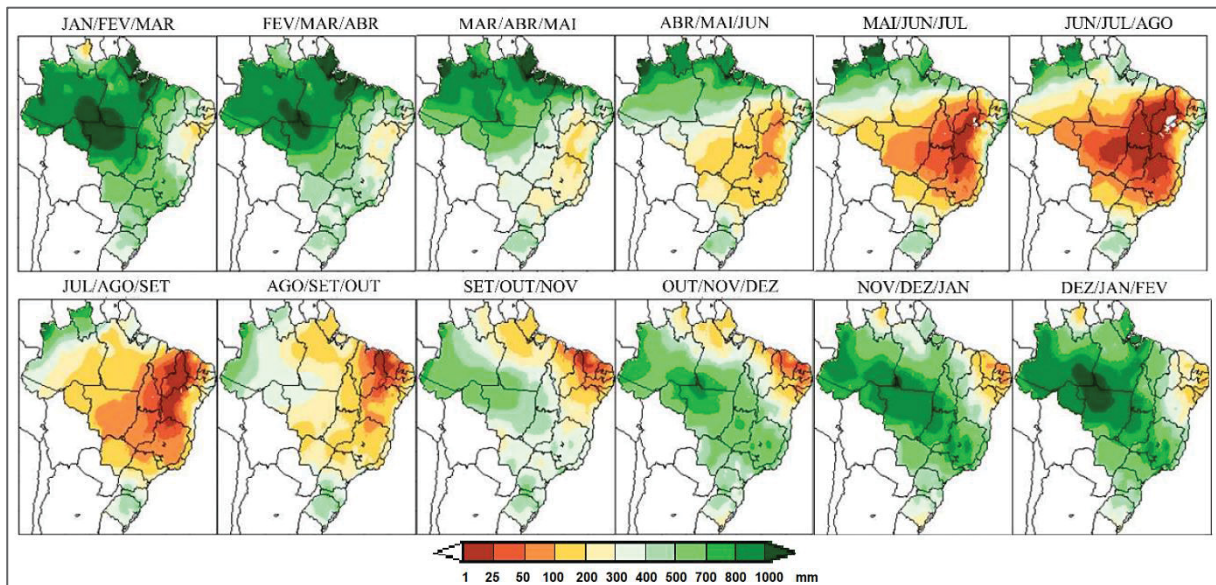
3.2.1 Áreas de estudo para a realização dos experimentos

Para estudar o efeito da refração troposférica nos experimentos, os dados para o desenvolvimento dos mesmos foram coletados em diferentes cenários da atmosfera neutra. Isto é, em diferentes regiões do território brasileiro e em diferentes estações do ano, verão e inverno. A fim de conhecer as variáveis mais influentes nas diferenças de cenários de atmosfera neutra, dados provenientes de radiossondas e de climatologia do CPTEC/INPE foram utilizados. A climatologia é o estudo do clima, ela considera o comportamento atmosférico médio ao longo de anos de informações (superior a 10 anos).

Dentre os fatores que influenciam na refração troposférica, como volume de precipitação, temperatura e umidade, a última é a que representa a maior influência e variabilidade. Iniciando pelo volume de precipitação, no Brasil, de uma forma geral, as maiores precipitações ocorrem no verão (Janeiro-Fevereiro-Março), nas regiões

Norte e Centro Oeste. Por outro lado, as menores precipitações ocorrem nas regiões Centro-Oeste, Nordeste e Sudeste no inverno (Junho-Julho-Agosto). A título de exemplo, na FIGURA 7 é apresentado um mapa de volume de precipitação no território brasileiro, construído a partir de dados de climatologia do CPTEC/INPE.

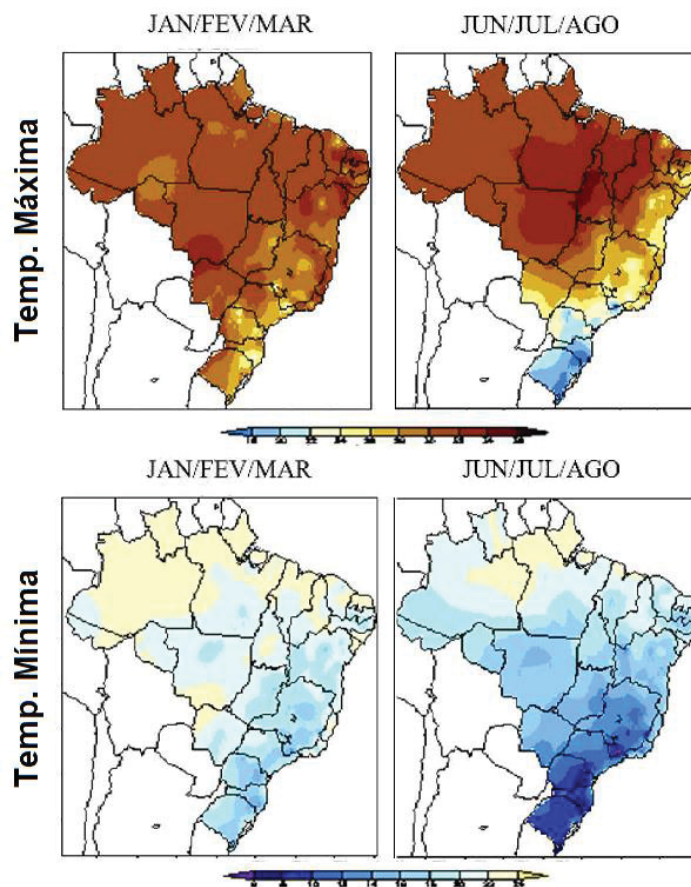
FIGURA 7 - VOLUME DE PRECIPITAÇÃO POR TRIMESTRE AO LONGO DO ANO



FONTE: <http://infoclima1.cptec.inpe.br/#>

Com relação às temperaturas, no Brasil, de uma forma geral, as temperaturas mais altas ocorrem nas regiões Nordeste e Centro-Oeste, até mesmo no inverno. Já as temperaturas mais baixas localizam-se na região Sul, que chega a apresentar valores negativos no inverno. Como exemplo, na FIGURA 8 são apresentados mapas construídos pelo CPTEC/INPE que indicam a variação da temperatura nas regiões do território brasileiro, para os quatro trimestres do ano.

FIGURA 8 - VARIAÇÃO DE TEMPERATURA (VERÃO E INVERNO)



FONTE: <http://infoclima1.cptec.inpe.br/#>.

Ao analisarem-se as características climatológicas mencionadas, e objetivando realizar os experimentos com o máximo de diferença possível nos cenários da atmosfera neutra, os dias dos meses de janeiro e julho foram selecionados para as análises de umidade na camada troposférica. Estas, por sua vez, tiveram o objetivo de verificar o dia mais úmido no verão (janeiro) e o dia mais seco no inverno (julho) nas camadas troposféricas. Uma vez que esta variável, conforme mencionado, é a que mais influencia na refração troposférica, dados medidos a partir de radiossondas tiveram que ser utilizados. A frequência de disponibilidade é de duas vezes ao dia, às 00h e às 12h UTC (21h e 9h UTC-Brasília). A distribuição espacial no território brasileiro dos locais com dados de sondagem atmosférica é apresentada na FIGURA 9. Tendo em vista que os dados do modelo de PNT utilizados nesta pesquisa são do ano de 2014, este ano foi selecionado para os experimentos.

FIGURA 10 - LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES DA RBMC UTILIZADAS NOS EXPERIMENTOS.



FONTE: Google Earth (2019).

Os gases não hidrostáticos têm grande variação espacial e temporal. Sua maior concentração se dá na região da troposfera (0 a 15 km), principalmente abaixo de 10 km, sendo mais significativa nos 4 km iniciais (GOUVEIA, 2019). Os dados de radiossondas contêm os valores de umidade relativa (%) ao longo das camadas atmosféricas. Na Figura 11 é apresentado, como exemplo, um trecho de um arquivo de dados de umidade para diferentes altitudes, para um determinado dia, proveniente da base de dados de sondagem atmosférica da Universidade de Wyoming.

FIGURA 11 - DADOS DE UMIDADE PROVENIENTES DE RADIOSSONDAS.

PRES hPa	HGHT m	TEMP C	DWPT C	RELH %	MIXR g/kg	DRCT deg	SKNT knot	THTA K	THTE K	THTV K
1000.0	69									
998.0	102	26.8	24.5	87	19.86	270	1	300.1	358.6	303.7
981.0	251	27.8	20.8	66	16.04	293	2	302.6	350.3	305.5
925.0	759	24.0	19.9	78	16.09	10	6	303.8	351.9	306.8
850.0	1495	18.4	17.0	92	14.56	340	5	305.4	349.2	308.1
845.0	1546	18.2	17.1	93	14.74	340	5	305.7	350.1	308.4
700.0	3142	10.0	9.8	99	10.98	330	4	313.5	347.8	315.6
663.0	3593	8.0	7.9	99	10.19	312	6	316.2	348.4	318.1
589.0	4565	4.0	-2.0	65	5.64	272	9	322.4	341.1	323.5
579.0	4705	3.2	-0.3	78	6.51	267	10	323.1	344.5	324.3
564.0	4917	2.4	-4.6	60	4.85	258	10	324.5	340.8	325.5
551.0	5104	1.1	-5.3	62	4.69	250	11	325.2	341.0	326.1

FONTE: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>.

Escolhidas as estações GNSS RBMC, os dados de umidade relativa foram obtidos e assim foram selecionados os dias de rastreio GNSS com maior umidade no verão (mês de janeiro) e com menor umidade no inverno (mês de julho). Dessa forma, as datas selecionadas para cada estação, assim como suas características de altitude, clima e temperatura média, encontram-se na TABELA 4. No GRÁFICO 1 são apresentados os comportamentos das umidades relativas ao longo das camadas troposféricas para os dias selecionados em cada uma das regiões das estações RBMC, às 12h UTC.

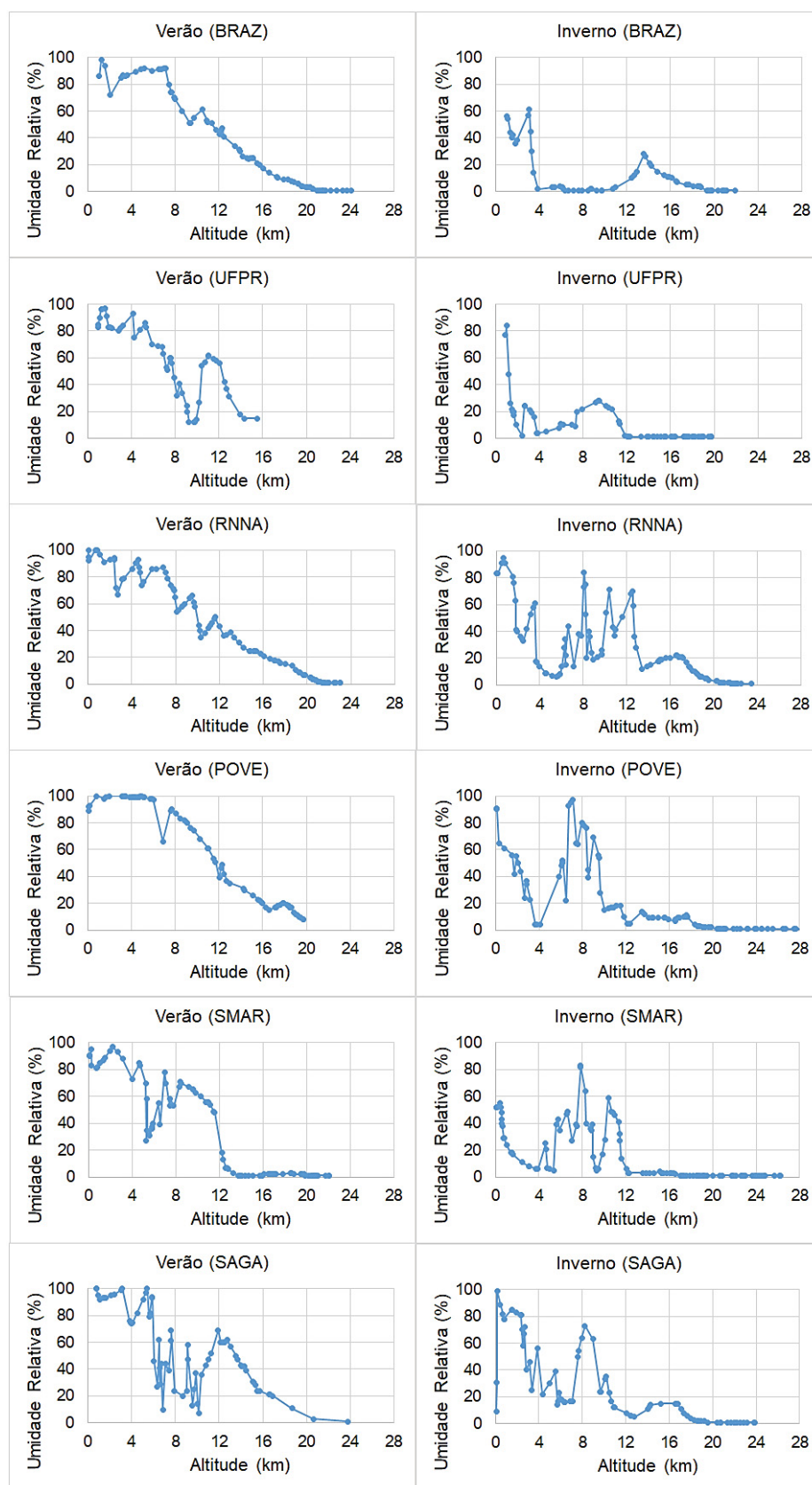
TABELA 4 - CARACTERÍSTICAS DAS ESTAÇÕES E DATAS DOS EXPERIMENTOS

Estações	Altitude (m)	Clima (Köppen–Geiger)	Temperatura Média Anual (°C)	Datas para os experimentos - verão e inverno
BRAZ	1106,02	Clima de Savana Tropical (Aw)	21,1	18/01/2014 e 03/07/2014
POVE	119,59	Clima de monção tropical (Am)	26,0	19/01/2014 e 31/07/2014
RNNA	45,965	Clima de Savana Tropical (Aw)	25,8	30/01/2014 e 15/07/2014
SAGA	94,886	Clima de floresta tropical (Af)	26,4	02/01/2014 e 24/07/2014
SMAR	113,107	Clima subtropical úmido (Cfa)	19,3	15/01/2014 e 22/07/2014
UFPR	925,807	Clima oceânico (Cfb)	17,1	04/01/2014 e 19/07/2014

FONTE: A Autora (2019).

A fim de obter uma menor influência dos efeitos ionosféricos, optou-se por realizar os experimentos das 12h UTC (9h UTC-Brasília) às 13h UTC (10h UTC-Brasília), por ser um período de menor interferência ionosférica, além de ser um dos horários de saída dos dados de radiossondagem e também de análise dos dados de ZHD e ZWD provenientes do modelo de PNT CPTEC/INPE, o que faz com que as previsões tenham maior acurácia, por não partir de um dado interpolado.

GRÁFICO 1 – GRÁFICOS DOS COMPORTAMENTOS DAS UMIDADES RELATIVAS AO LONGO DAS CAMADAS TROPOSFÉRICAS PARA OS DIAS SELECIONADOS, EM CADA UMA DAS REGIÕES DAS ESTAÇÕES RBMC, ÀS 12H UTC.



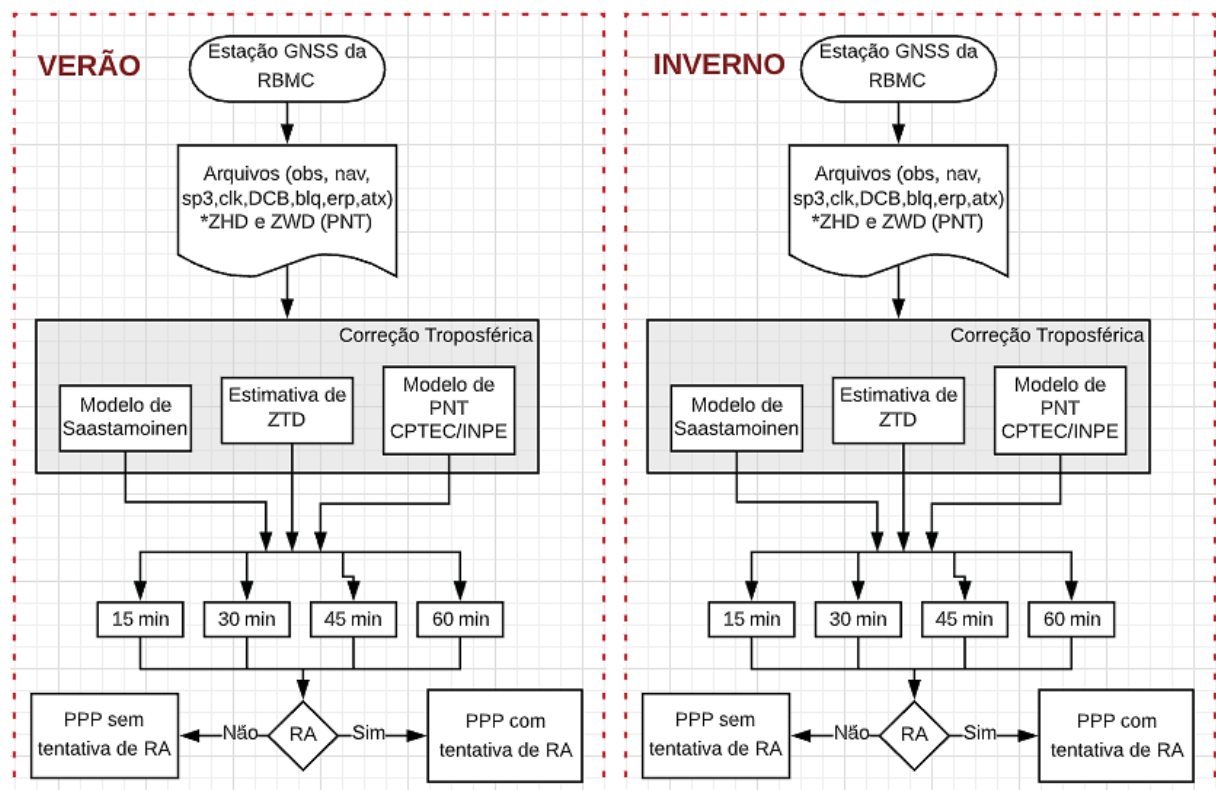
Fonte: A autora (2019)

A partir da análise dos valores nos gráficos é possível verificar a grande concentração e variação de umidade nos 10 km iniciais da atmosfera. Ademais, constata-se uma grande quantidade de umidade no verão em relação ao inverno. No entanto, esse período apresentou comportamento de umidade mais estável, com exceção do ocorrido na região da estação SAGA, na qual percebe-se variabilidade elevada em ambos os períodos, verão e inverno. Vale ressaltar também a alta variação de umidade, entre 0 e 12 km, ocorrida nas regiões das estações RNNA, POVE e SMAR no período do inverno.

3.2.2 Experimentos

Para um melhor entendimento das características dos experimentos realizados nesta pesquisa, na FIGURA 12 são apresentadas as etapas dos processamentos, abrangendo os grupos de experimentos e suas características, totalizando 144 experimentos.

FIGURA 12 – PROCEDIMENTOS REALIZADOS NO PROCESSAMENTO GNSS



FONTE: A autora (2019)

Para cada estação foram realizados 24 experimentos, equivalentes à análise de três formas diferentes de correção da refração troposférica (modelo Saastamoinen, estimativa de ZTD e modelo de PNT CPTEC/INPE), com e sem a RA, e analisando 4 intervalos de tempo de rastreamento (15, 30, 45 e 60 minutos), no PPP no modo estático, para os períodos verão e inverno. O modelo Saastamoinen e a estimativa do ZTD estão disponíveis no RTKLIB v. 2.4.2. Para o caso do uso do modelo de PNT CPTEC/INPE, houve a inclusão de uma ferramenta no RTKLIB 2.4.2 para importação dos dados de ZHD e ZWD e um posterior uso destes para a correção da refração troposférica. Para tal tarefa utilizou-se a linguagem de programação C. A função de mapeamento utilizada foi a de Niell já presente no RTKLIB 2.4.2.

3.3 ETAPA 2: UTILIZAÇÃO DO MODELO DE PNT CPTEC/INPE

O CPTEC disponibiliza o pacote do interpolador para a obtenção dos valores das previsões (ZHD e ZWD), no domínio coberto pelo produto, além dos arquivos binários por época. Para executar a interpolação espacial, basta inserir as coordenadas (latitude, longitude e altitude) do ponto, assim como os arquivos binários da época de interesse, no arquivo de gerenciamento do programa que se encontra dentro do pacote do interpolador. Como resultado da interpolação, obtém-se um arquivo (.txt) que fornece as previsões dos valores de ZHD e ZWD, por dois dias, a partir das 0h UTC de um determinado dia, gerando previsões num intervalo temporal de 3 horas.

Após realizar essa interpolação espacial para as estações de estudo, realizou-se uma interpolação linear temporal das previsões de ZHD e ZWD, no software Matlab, a partir das previsões de 12h e 15h UTC, num intervalo de 15 segundos (correspondente ao intervalo de gravação das observações GNSS do RINEX), para compatibilizar esses dados com a época das observáveis GNSS.

Para o processamento dos arquivos RINEX das estações RBMC escolhidas, a partir da importação e leitura dos dados disponibilizados pelo modelo de PNT CPTEC/INPE, utilizou-se a biblioteca de software livre RTKLIB v. 2.4.2. Este software possui duas formas de utilização pelo usuário, através de sua interface gráfica (GUI - *Graphical User Interface*) ou por meio de sua interface de linha de comandos (CUI - *Command-Line User Interface*). O RTKLIB possui diversas

aplicações conforme sua função. Para esta etapa, utilizou-se a interface CUI RNX2RTKP, que corresponde a GUI RTKPOST, e tem como função definir as configurações de pós-processamento e realizar o mesmo.

Essas aplicações encontram-se disponíveis na plataforma GITHUB do projeto RTKLIB. Uma vez que no RTKLIB v. 2.4.2 não há a opção de importação e leitura de dados de ZHD e ZWD provenientes de fontes externas, criou-se uma versão modificada do software para permitir tal tarefa. Isso foi realizado alterando-se o código-fonte da aplicação, através das equações (39) e (55), de modo a calcular o valor do atraso troposférico a partir dos valores interpolados de ZHD e ZWD, do modelo de PNT CPTEC/INPE, e das componentes hidrostática e não hidrostática da função de mapeamento de Niell. Os valores de atraso troposférico foram calculados de acordo com a época das observáveis GNSS.

3.4 ETAPA 3: PREPARAÇÃO E PROCESSAMENTO DOS DADOS

3.4.1 Procedimentos Realizados

Depois da verificação dos dados das radiossondagens e de climatologia do CPTEC para a escolha dos locais dos experimentos, foram obtidos os arquivos RINEX diários das estações da RBMC em análise. Para a correção dos efeitos de refração da troposfera, utilizou-se a interface gráfica do software RTKLIB v. 2.4.2 para realizar o processamento com o modelo Saastamoinen e com a estimativa de ZTD, e sua interface de linha de comandos modificada, para o processamento com o modelo de PNT CPTEC/INPE. Os processamentos nas duas interfaces foram executados mantendo as mesmas características.

Os processamentos foram realizados utilizando-se as medidas GPS dos códigos C1C e C2W e das fases nas portadoras L1 e L2. As observáveis GLONASS não foram consideradas, uma vez que não há possibilidade no RTKLIB de tentativa de RA para sinais desta constelação. Além disso, os arquivos .grg não disponibilizam *bias* de WL para a constelação GLONASS.

Nos experimentos utilizou-se máscara de elevação de 10°, a fim de minimizar os efeitos de atenuação e cintilação atmosférica. Para eliminar os efeitos de primeira ordem da ionosfera, utilizou-se a combinação IF, que também elimina a tendência diferencial envolvendo as observáveis C1C e C2W, L1 e L2. Já para

modelar a tendência diferencial entre os códigos C1W e C1C no hardware dos satélites, utilizou-se arquivos DCB (*Differential Code Bias*) C1P1 precisos.

Foram utilizadas as efemérides precisas finais (.sp3) para a correção dos erros das órbitas. Para a RA utilizou-se o método baseado na recuperação dos relógios de Laurichesse *et al.*, (2008), que é o método disponível no software RTKLIB v. 2.4.2, com algumas modificações, e os arquivos de relógio (.clk) de solução “grg”.

Os arquivos de relógios (.grg) também foram usados para corrigir os DCB C1W-C1C e as variações dos centros de fase das antenas transmissoras. Mas, ainda assim, foi utilizado o arquivo ANTEX IGS08_1930.atx, que contém os valores de deslocamento do centro de fase PCO e de variação dos deslocamentos PCV para todos os satélites GNSS. Isso tendo em vista que em 2014 as coordenadas dos satélites GPS nas efemérides precisas eram referenciadas ao IGB08. Para as correções das variações dos centros de fase da antena do receptor, foram utilizados os arquivos ANTEX gerados a partir dos dados de calibrações absolutas realizadas pelo NGS (do inglês *National Geodetic Survey*).

Além disso, foram empregados os arquivos finais (.erp), dos parâmetros de rotação da Terra (ERP – do inglês *Earth Rotation Parameters*), para a correção do movimento do polo disponibilizado pelo IGS. Também foram levados em consideração os erros de fase *Wind-up* (seção 2.2.1.3) e os efeitos geodinâmicos de marés terrestres, através dos arquivos de carga oceânica, utilizando o modelo FES2004, conforme recomendado pelo IERS.

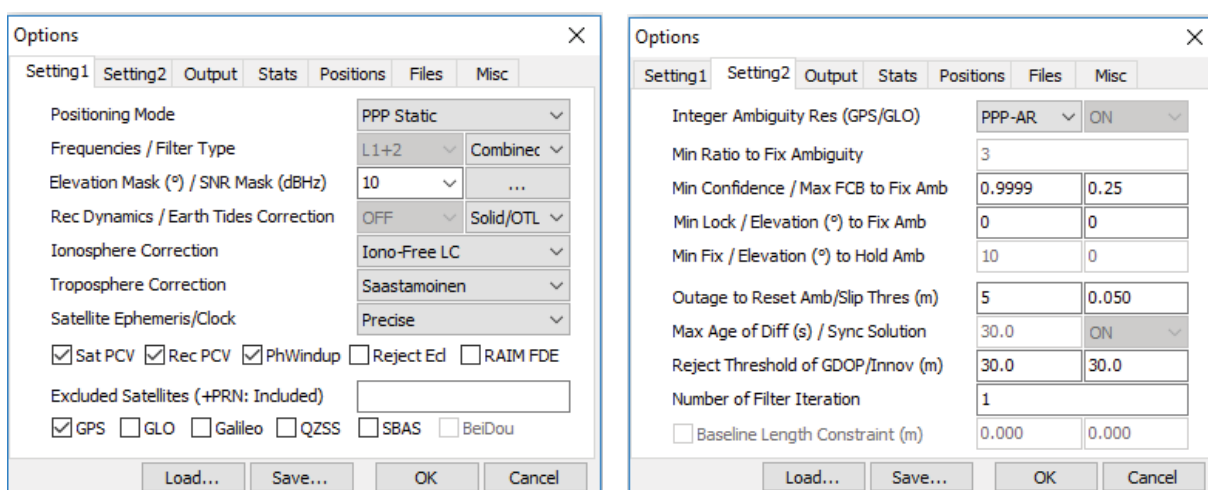
Após a inserção dos arquivos no software, realizou-se o processamento dos dados aplicando-se o modelo Saastamoinen sem tentativa de RA, selecionando a opção “OFF” para a RA. Em seguida, com a tentativa de RA, selecionando a opção “PPP-AR” (FIGURA 13). O mesmo foi feito aplicando-se a estimativa do ZTD. Por fim, realizou-se os mesmos procedimentos aplicando-se a leitura dos dados do modelo de PNT CPTEC/INPE na interface de linha de comando modificada, para posterior comparação dos resultados obtidos. Após os processamentos foram obtidas as coordenadas referenciadas ao Sistema de Referência Terrestre (SRT) IGB08 (pois na época ainda não tinha sido realizado o ITRF14) e seus respectivos desvios padrão na época do rastreo.

Nos métodos de RA para o PPP, antes que as ambiguidades WL sejam aproximadas para o inteiro mais próximo, é realizada uma verificação da diferença

máxima entre ambiguidades reais e inteiras. Se essa diferença for inferior a um determinado valor de ciclos, então é tomada a decisão de RA. No RTKLIB o valor padrão é de 0,25 ciclos, referente ao critério de probabilidade (nível de confiança) para RA WL de 99%. Com relação à contagem de interrupções para redefinir a ambiguidade o valor padrão é de 5 interrupções. Com relação à perda de ciclo, o RTKLIB utiliza a diferença entre épocas da fase da portadora na combinação livre de geometria (RTKLIB, 2013), sendo que o limiar padrão é de 0,05 ciclos. Para validar as ambiguidades inteiras calculadas, o valor crítico do teste ratio no software RTKLIB é fixado como três.

Na FIGURA 13 são apresentadas algumas configurações de processamento para o caso dos experimentos com a tentativa de RA.

FIGURA 13 – CONFIGURAÇÕES DE PROCESSAMENTO NO RTKLIB v. 2.4.2 PARA O PPP COM RA



FONTE: A autora (2019).

3.5 ETAPA 4: PROCEDIMENTOS REALIZADOS PARA ANÁLISE DE ACURÁCIA

Após a realização dos experimentos a análise estatística da acurácia dos resultados dos experimentos foi feita, com base nos cálculos das raízes dos erros quadráticos médios (REQM) das discrepâncias entre as coordenadas estimadas e as coordenadas oficiais das estações RBMC. Tais valores de acurácia foram obtidos no Sistema Geodésico Local, separados em componentes planimétricas e altimétrica. A equação para a determinação da REQM em uma determinada componente é (MIKHAIL; ACKERMANN, 1976):

$$REQM = \sqrt{\Delta^2 + \sigma_{exp}^2 + \sigma_{RBMC}^2}, \quad (58)$$

onde Δ é diferença entre a coordenada estimada e a oficial da RBMC, σ_{exp} é a precisão da solução obtida na última época do ajustamento em cada experimento e σ_{RBMC} é a precisão da coordenada da estação RBMC.

Porém, antes dos cálculos da REQM, foi necessário compatibilizar o Sistema de Referência Terrestre (SRT) de saída do processamento no RTKLIB v. 2.4.2 com o SRT nas quais as coordenadas das estações RBMC são referenciadas. Isto é, transformar as coordenadas referenciadas ao SRT IGB08 para coordenadas referenciadas ao SRT SIRGAS 2000. Uma vez que a época de processamento foi a das efemérides precisas, a compatibilização para a época 2000,4 do SRT SIRGAS 2000 também teve que ser realizada. Nesta etapa, utilizou-se o campo de velocidades oficial do SIRGAS 2000, isto é, o VEMOS 2017, com o objetivo de obter os vetores de velocidades de cada uma das estações de experimentos. De posse das coordenadas e velocidades das estações, e suas respectivas precisões, a compatibilização de SRT e de época foi feita utilizando-se a transformação de Helmert indicada a seguir, em conjunto com os valores de parâmetros divulgados em IBGE (2015), os quais são apresentados na TABELA 5.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{SIRGAS} = \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} + (1 + \delta\mu)R \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{época\ IGB08} + \begin{bmatrix} V_X \\ V_Y \\ V_Z \end{bmatrix}_{IGB08} (2000,4 - época), \quad (59)$$

onde X , Y e Z são as coordenadas cartesianas geocêntricas das estações, em metros; V_X , V_Y e V_Z são as componentes da velocidade da placa tectônica no campo de velocidades selecionado, em metros por segundo; ΔX , ΔY e ΔZ são as componentes de translação, em metros; $\delta\mu$ é o elemento diferencial do fator de escala; *época* é a época de saída do processamento; e R é a matriz de rotação dada pela equação (60):

$$R = R_Z(\varepsilon_Z)R_Y(\varepsilon_Y)R_X(\varepsilon_X), \quad (60)$$

sendo ε_X , ε_Y e ε_Z os ângulos de rotação em torno dos eixos X , Y e Z , respectivamente.

TABELA 5 – PARÂMETROS DE TRANSFORMAÇÃO DO IGB08 (ITRF2008) PARA O SIRGAS 2000

ΔX (m)	ΔY (m)	ΔZ (m)	$\Delta\mu$ (ppb)	ε_X (mas)	ε_Y (mas)	ε_Z (mas)
0,0020	0,0041	0,0039	-1,0	0,170	-0,030	0,070

FONTE: IBGE (2015).

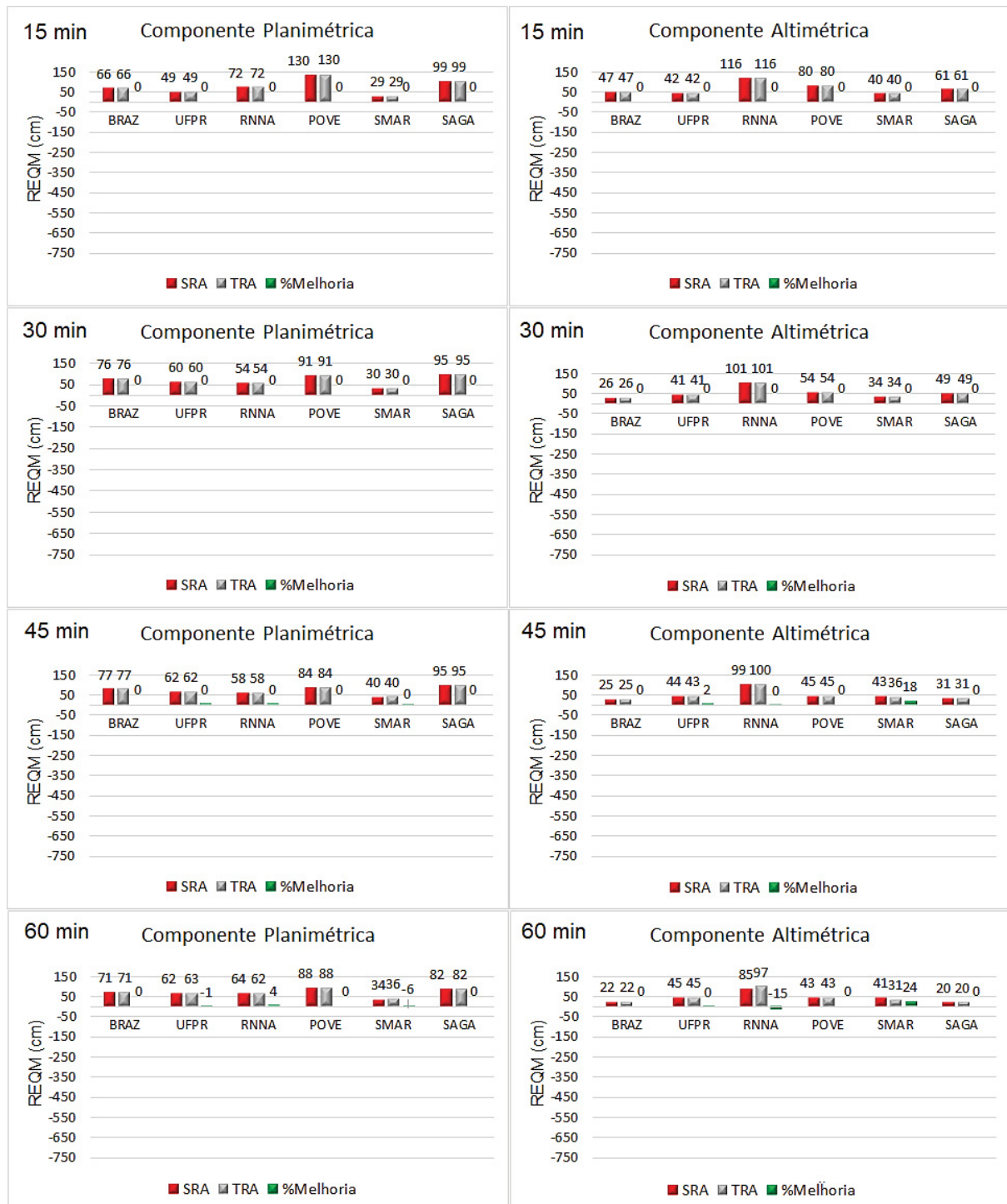
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, nas seções 4.1, 4.2 e 4.3 são apresentados os resultados dos experimentos mencionados e caracterizados no capítulo 3, seção 3.2. Os resultados de cada experimento foram comparados a partir da análise de acurácia para as componentes planimétrica (2D) e altimétrica no SGL. Para uma melhor análise, as porcentagens de melhorias na acurácia do posicionamento com a tentativa de RA em relação à não tentativa de RA foram calculadas.

4.1 RESULTADOS OBTIDOS UTILIZANDO-SE O MODELO SAASTAMOINEN

A utilização do modelo de Saastamoinen para a correção da refração troposférica não possibilitou a RA em nenhum dos intervalos de rastreo, tanto para os experimentos realizados no verão quanto para os experimentos realizados no inverno. Os resultados em termos de acurácia (REQM) planimétrica resultante e altimétrica, em todos os intervalos de rastreo analisados, para o verão, sem tentativa de RA (SRA) e com tentativa de RA (TRA), ou seja, com a opção de RA ativada no processamento, são apresentados no GRÁFICO 2.

GRÁFICO 2 - RESULTADOS OBTIDOS DE ACURÁCIA COM O MODELO DE SAASTAMOINEM NO VERÃO



FONTE: A autora (2020)

Em relação a componente planimétrica, no GRÁFICO 2 pode-se observar que em todas as estações, exceto RNNA e SAGA, houve uma diminuição na acurácia (aumento da REQM) no intervalo de 15 a 45 minutos. Apenas nas regiões das estações BRAZ, SMAR e SAGA houve um aumento da acurácia (diminuição da

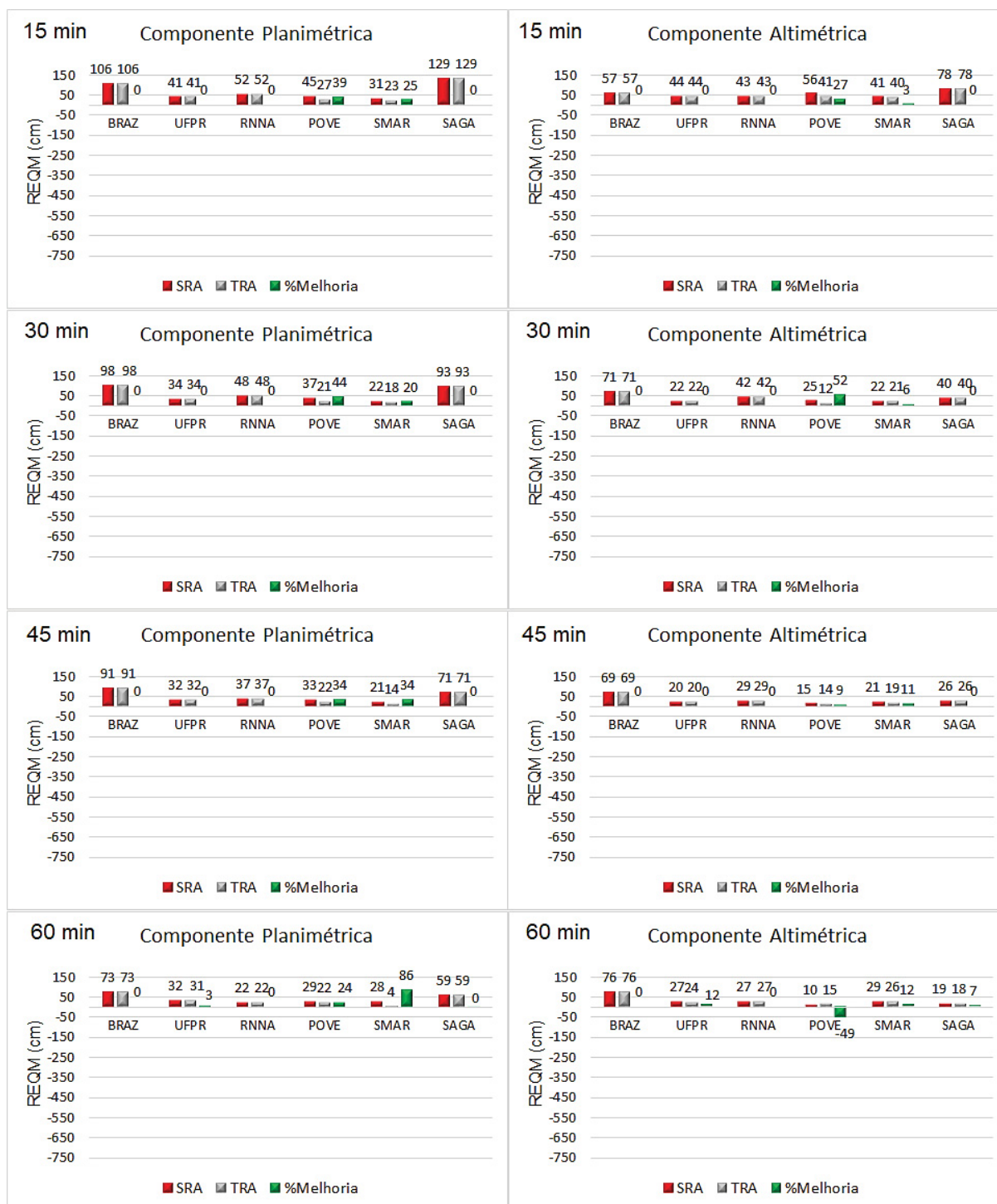
REQM) do intervalo de 45 minutos a 60 minutos. As piores acurácias, isto é, maiores valores da REQM, foram de 130 cm e 99cm, nas regiões das estações POVE e SAGA, no intervalo de 15 minutos. Nessas estações ocorreram também os maiores resultados da REQM no intervalo de 60 minutos, chegando a 88 cm na região da estação POVE e 82 cm na região da estação SAGA. Isso provavelmente é devido à grande umidade presente nesses locais, a qual não é modelada adequadamente pelo modelo Saastamoinen, devido à forma como o mesmo foi elaborado (seção 2.5.2.1). A melhor acurácia, isto é, menor resultado da REQM, ocorreu na região da estação SMAR, no intervalo de 15 minutos. Em 60 minutos de rastreo esse valor subiu para 34 cm sem a RA e 36 cm com a tentativa de RA, equivalente a uma piora de 6% na acurácia.

Na componente altimétrica, os valores da REQM variaram de 116 cm na região da estação RNNA, no intervalo de 15 minutos, a 20 cm, no intervalo de 60 minutos, na região da estação SAGA. Ademais, exceto nas regiões das estações UFPR e SMAR, os valores da REQM diminuíram ao longo do tempo de rastreo, tornando-se mais acurados. Apenas na região da estação RNNA o valor da REQM estava acima de 45 cm, no intervalo de 60 minutos de rastreo, apresentando ainda uma degradação de 15% com a tentativa de RA. Provavelmente esse resultado menos acurado é devido à altitude dessa estação, haja vista que é a estação de menor altitude (45,96 m), dessa forma, a camada atmosférica é maior nessa região do que nas demais. A única estação na qual houve melhoria de acurácia com a tentativa de RA foi a SMAR, cujo valor chegou a 24%.

De acordo com os resultados, verifica-se que os valores da REQM na componente altimétrica foram mais acurados do que na componente planimétrica, com exceção de SMAR e RNNA. Em SMAR os resultados em tais componentes foram semelhantes. Já na RNNA o valor da REQM na componente altimétrica foi igual a aproximadamente o dobro do encontrado na componente altimétrica, nos intervalos de 30 e 45 minutos. O que pode ter ocorrido devido a sua menor altitude.

No GRÁFICO 3 tem-se os resultados dos valores da REQM a partir do modelo Saastamoinen para o período do inverno.

GRÁFICO 3 - RESULTADOS OBTIDOS DE ACURÁCIA COM O MODELO DE SAASTAMOINEM NO INVERNO



FONTE: A autora (2020)

No período do inverno, com menor umidade na troposfera, em relação à componente planimétrica, o posicionamento foi mais acurado, com menores valores da REQM do que no período do verão, com exceção de BRAZ, na qual os valores da REQM no intervalo final de 60 minutos foram 73 cm (inverno) e 71 cm (verão).

Como uma justificativa tem-se o fato do modelo Saastamoinen ser mais adequado para modelar a refração troposférica em climas mais secos, sendo mais eficiente no inverno.

A menor acurácia foi obtida na região da estação SAGA, onde o REQM apresentou-se igual a 129 cm no intervalo de 15 minutos, provavelmente devido à grande umidade dessa região que dificulta a modelagem troposférica. Ademais, o valor da REQM ficou em 73 cm em BRAZ e 59 cm, no intervalo de 60 minutos. As demais estações apresentaram valor da REQM abaixo de 33 cm. A maior acurácia ocorreu na SMAR, com valor da REQM igual a 4 cm com a tentativa de RA, que corresponde a uma melhoria de 86% em relação a não tentativa.

No que se refere à componente altimétrica, as acurácias aumentaram com o aumento do tempo de rastreo, com exceção de BRAZ, cuja solução final (76 cm) ficou menos acurada do que no intervalo inicial de 15 minutos (57 cm); e de SMAR, que passou de 19 cm com RA, no intervalo de 45 minutos, para 26 cm com RA, no intervalo de 60 minutos de rastreo. Na solução final, intervalo de 60 minutos, com exceção de BRAZ, os valores da REQM ficaram abaixo de 30 cm, sendo o valor mínimo equivalente a 10 cm, sem RA, e 15 cm, com RA, na região da estação POVE.

Comparando-se os resultados nos períodos verão e inverno, a maior discrepância na solução final em relação a ambos os períodos se deu na componente altimétrica de BRAZ, na qual o valor da REQM foi de 22 cm no verão e 76 cm no período do inverno.

4.2 RESULTADOS OBTIDOS UTILIZANDO-SE O MODELO DE PNT CPTEC/INPE

Para aplicação do modelo de PNT CPTEC/INPE, os dados de ZWD e ZHD, derivados do modelo Eta15km do CPTEC/INPE foram obtidos para o ano de 2014, com amostragem de 3 em 3h. Esse ano foi escolhido por ser uma época em que o modelo Eta15km estava operacional e consolidado. Ademais, conforme mencionado no capítulo 3, foram escolhidos os meses de Janeiro e Julho, por serem as épocas de maior e menor umidade, respectivamente, conforme pode-se observar na FIGURA 7, apresentada na seção 3.2.1. Os dados do modelo WRF não foram empregados na realização dos experimentos, pois não estavam operacionais na época (junho de 2018).

Na TABELA 6 podem-se encontrar os resultados dos valores de ZHD e ZWD, gerados pelo modelo Eta15km do CPTEC/INPE, para as regiões das estações de estudo, nos horários de 12 e 15 horas UTC (9 e 12h UTC-Brasília), para os períodos de verão e de inverno. De forma geral, pode-se observar que o aumento da umidade na camada troposférica para a região refletiu diretamente no aumento dos valores de ZWD, conforme era esperado. Vale ressaltar que, diferente das demais regiões de estações, a região da estação SMAR apresentou-se com maior umidade no inverno do que no verão.

TABELA 6 - VALORES DE ZHD E ZWD ÀS 12 E 15 HORAS UTC, PARA OS PERÍODOS DE VERÃO E INVERNO, EM METROS

		VERÃO		INVERNO	
		12 hrs (UTC)	15 hrs (UTC)	12 hrs (UTC)	15 hrs (UTC)
BRAZ	ZHD	2,0347	2,0336	2,0459	2,0460
BRAZ	ZWD	0,2594	0,2599	0,1204	0,1256
UFPR	ZHD	2,0842	2,0817	2,0911	2,0918
UFPR	ZWD	0,2775	0,2758	0,0630	0,0586
RNNA	ZHD	2,2960	2,2896	2,3081	2,3088
RNNA	ZWD	0,2953	0,3017	0,2007	0,2036
POVE	ZHD	2,2742	2,2769	2,2724	2,2735
POVE	ZWD	0,3677	0,3792	0,2414	0,2406
SMAR	ZHD	2,2774	2,2747	2,2725	2,2718
SMAR	ZWD	0,2164	0,1985	0,2680	0,2574
SAGA	ZHD	2,2774	2,2761	2,2788	2,2817
SAGA	ZWD	0,3694	0,3668	0,2666	0,2759

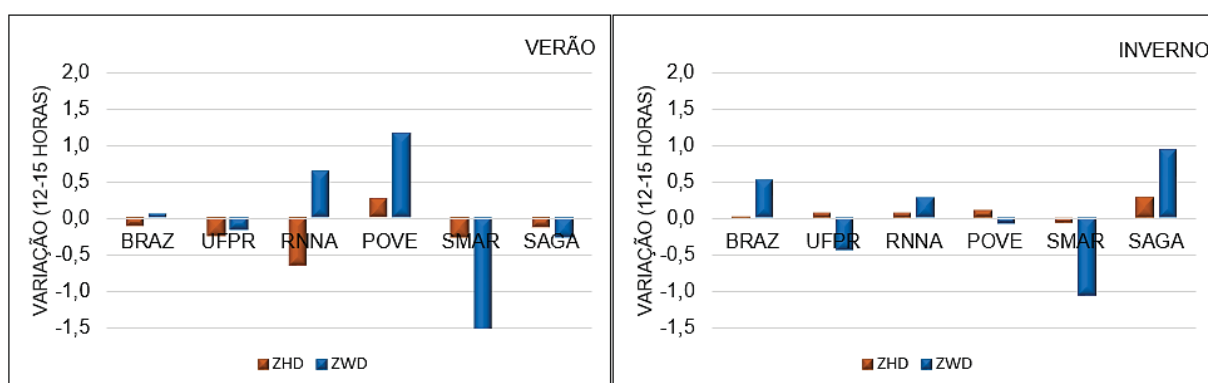
FONTE: A autora (2019)

A partir desses dados é possível verificar que, no verão, nas regiões das estações BRAZ e SMAR foram verificados os menores valores de ZHD e ZWD, respectivamente, em relação às demais regiões de estações. Para o mesmo período, o maior valor de ZHD se deu na região da estação RNNA. No inverno, os menores valores de ZHD e ZWD ocorreram nas regiões das estações BRAZ e UFPR, respectivamente. Já o maior valor de ZHD, em média foi verificado na região da estação SAGA. Além disso, nos experimentos analisados pode-se verificar também que o valor de ZHD apresenta menor variação em relação ao valor de ZWD, conforme já era esperado. A região da estação SAGA foi a que apresentou maior

umidade, e consequentemente maior valor de ZWD, em ambos os períodos em relação às demais estações analisadas.

No GRÁFICO 4 são apresentados os valores da variação de ZHD e ZWD ao longo de 3 horas (de 12 às 15 horas UTC). Pode-se verificar que, no verão, as regiões das estações SMAR, POVE e RNNA foram as que apresentaram a maior variação do valor de ZWD, sendo de 1,79 cm, -1,15 cm e -0,64 cm, respectivamente. A região da estação RNNA apresentou a maior variação do valor do ZHD em relação às demais estações, equivalente a 0,64 cm. No inverno, as maiores variações de ZWD ocorreram nas regiões das estações SMAR, SAGA e BRAZ. Nesse mesmo período, a região da estação SAGA apresentou a maior variação do valor de ZHD, em relação às demais estações.

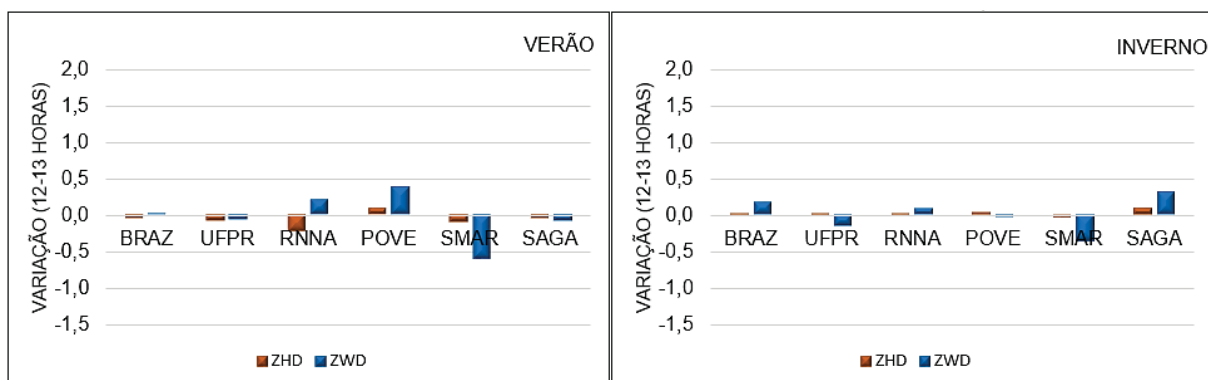
GRÁFICO 4 - VARIAÇÃO DO ZHD E DO ZWD NO PERÍODO DE 3 HORAS, EM CENTÍMETROS



FONTE: A autora (2019)

A partir da interpolação linear dos dados de três em três horas, os valores de variações de ZHD e ZWD no período de uma hora puderam ser verificados (GRÁFICO 5). É possível verificar que tanto o ZHD quanto o ZWD apresentam uma menor variação em relação ao intervalo de três horas. Isso é devido à interpolação linear que gerou esses dados, a qual limita os resultados aos valores de base da interpolação, desconsiderando assim os fenômenos que podem ter ocorrido dentro do intervalo de três horas.

GRÁFICO 5 - VARIAÇÃO DO ZHD E DO ZWD NO PERÍODO DE 1 HORA, EM CENTÍMETROS



FONTE: A autora (2019)

Na TABELA 7 é apresentado o tempo de rastreo gasto para a ocorrência da indicativa de RA para as estações de estudo, nos períodos de verão e inverno, ao se utilizar o modelo de PNT CPTEC/INPE. O menor tempo despendido na RA das ambiguidades ocorreu na região da estação RNNA e o maior tempo na região da estação SAGA, ambas no período do verão. Exceto em duas estações (POVE e SAGA) a RA ocorreu mais rapidamente no verão. Isto pode ter correlação com a adequabilidade da modelagem às condições locais da troposfera nas regiões das estações analisadas. Em alguns casos, a tentativa de RA gerou melhorias e piores que serão apresentadas a seguir.

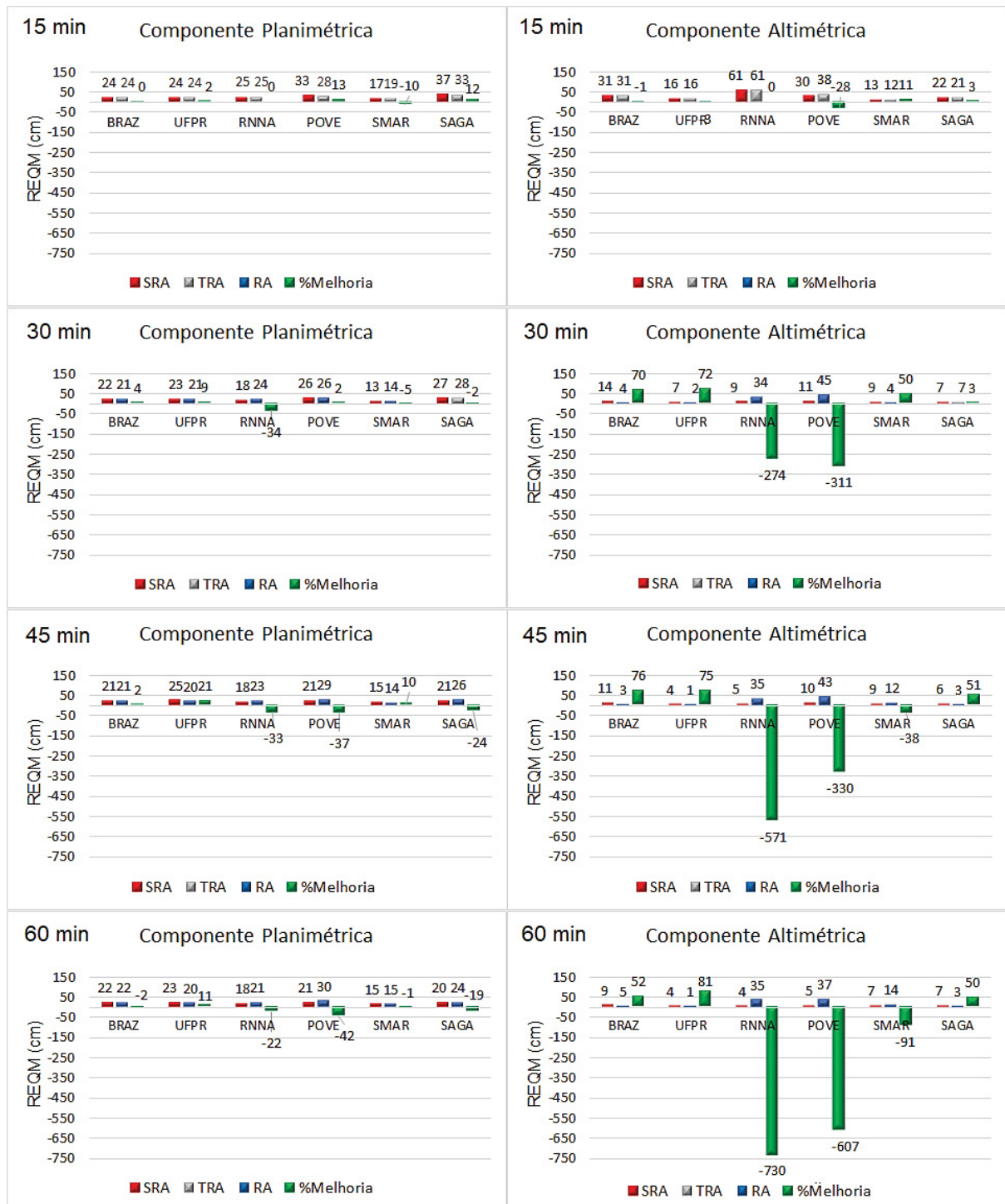
TABELA 7 - TEMPO DE RASTREIO GASTO PARA A OCORRÊNCIA DA INDICATIVA DE RA UTILIZANDO-SE O MODELO DE PNT CPTEC/INPE

	VERÃO	INVERNO
BRAZ	23 minutos e 30 seg	28 minutos e 45 seg
UFPR	23 minutos	25 minutos e 15 seg
RNNA	17 minutos e 15 seg	34 minutos
POVE	24 minutos e 15 seg	21 minutos e 45 seg
SMAR	20 minutos e 15 seg	27 minutos e 45 seg
SAGA	36 minutos	24 minutos e 30 seg

FONTE: A autora (2020)

No GRÁFICO 6 tem-se os resultados de acurácia (REQM) para os experimentos sem tentativa de RA (SRA), com tentativa de RA bem sucedida (RA), com tentativa de RA mal sucedida (TRA) e a porcentagem de melhorias, para o período do verão, utilizando-se o modelo de PNT CPTEC/INPE.

GRÁFICO 6 - RESULTADOS OBTIDOS DE ACURÁCIA COM O MODELO DE PNT CPTEC/INPE NO VERÃO



FONTE: A autora (2020).

No GRÁFICO 6, pode ser verificado que, com relação à componente planimétrica, os valores da REQM já se encontravam abaixo de 40 cm nos primeiros 15 minutos de rastreo, com a acurácia aumentando, de uma forma quase geral, à medida que se considerou o aumento do tempo de rastreo. No intervalo de 30

minutos, a RA havia ocorrido em todas as estações, exceto na estação SAGA, que se deu no intervalo de 45 minutos. Observa-se também que os resultados menos acurados com a RA foram nas regiões das estações POVE, SAGA e RNNA, nas quais há a presença de maior umidade nas camadas troposféricas, maiores valores de ZWD (TABELA 6), maiores variações do mesmo em três horas (GRÁFICO 4) e menores altitudes. Conforme mencionado anteriormente, a altitude mais próxima do nível do mar acarreta em uma maior quantidade de massa atmosférica no caminho do sinal entre o satélite e o receptor, o que pode vir a afetar de forma mais significativa a acurácia do posicionamento.

Particularmente para as estações POVE e RNNA, as pioras nos resultados indicam prováveis casos de má RA (*bad fix*), principalmente evidenciadas pelas degradações acentuadas nas acurácias da componente altimétrica (maiores que 100%). Estes casos de má RA podem estar relacionados com o fato de que quando se tem o processo de RA, os resultados tornam-se mais sensíveis às qualidades das modelagens dos erros sistemáticos. No caso da troposfera, passa a haver uma forte dependência de uma boa resposta local na modelagem. Caso haja inconsistência no modelo, o erro remanescente será absorvido pela ambiguidade, podendo levar a mesma a um inteiro incorreto (má RA). Uma vez que há o injuncionamento das mesmas no ajustamento sequencial para as épocas subsequentes, desde que não haja perda de ciclo em excesso, o erro do inteiro incorreto pode vir a ser propagado, degradando os resultados de forma crescente.

Dentro deste contexto, tem-se o fato de que os valores de ZWD e ZHD do modelo PNT CPTEC/INPE são disponibilizados com resolução temporal de três horas, o que não possibilita a modelagem de pequenas flutuações dos fatores que influenciam os valores do atraso troposférico em intervalos menores de tempo. Assim, as quantidades de erros sistemáticos que não forem modeladas podem ser absorvidas pelas ambiguidades, levando a pioras nos resultados. Conforme indicado no GRÁFICO 4, a variação do ZWD em 3 horas para a região da estação POVE é de -1,15 cm, sendo maior em relação às demais. Adicionalmente, outro fator que pode ter influenciado para a má RA nesta estação é a resolução espacial do modelo, de 15 km. Neste caso, o valor de ZWD, calculado a partir de interpolação espacial, pode ter sido afetado significativamente por amostragem não adequada. Cenário semelhante pode ter ocorrido para a estação RNNA, com as questões adicionais da variação no ZHD de 0,64 cm, a maior em relação às regiões das demais estações e;

a menor altitude também em relação às demais estações. Além disso, ambas são regiões de maior temperatura, que é outro fator que pode afetar a modelagem troposférica.

Para o caso da região da estação SAGA, uma vez que houve uma variação relativa pequena no ZWD (menos que 0,5 cm) em três horas, apenas as questões da amostragem na resolução espacial, da baixa altitude e da maior umidade é que podem ter influenciado nos resultados. Porém, o caso de má RA para esta estação não pode ser indicado, uma vez que houve melhora significativa nas acurácias altimétricas, conforme será apresentado a frente. Por outro lado, para a região da estação SMAR, nem a questão da amostragem de 15 km na resolução espacial, nem a maior variação relativa do valor de ZWD (1,79 cm) em três horas, foram capazes de afetar os resultados de acurácia planimétrica com a RA, em relação ao experimento SRA. Os resultados se apresentaram praticamente semelhantes, com diferença máxima de 1 cm após a RA ocorrer. A menor umidade na camada troposférica para a região desta estação provavelmente contribuiu positivamente para os resultados planimétricos. No caso desta estação, para sessenta minutos de rastreo obteve-se o posicionamento mais acurado de todos para este intervalo, com REQM igual a 15 cm.

O menor valor da REQM ocorreu em SMAR (13 cm sem a RA e 14 cm com a RA), no intervalo de 30 minutos. Na estação UFPR foi a única na qual a RA acarretou apenas melhorias positivas. Nas demais houve melhorias negativas, como em POVE, com 45% de degradação no intervalo de 60 minutos. Um fator adicional que pode ter influenciado para a instabilidade das RA é o fato da ferramenta de RA no PPP do RTKLIB v. 2.4.2 estar ainda em caráter experimental, conforme indicado por RTKLIB (2013).

No que concerne à componente altimétrica, nota-se que as prováveis más RA proporcionaram significativa piora das acurácias altimétricas nas regiões das estações POVE e RRNA, a partir de 30 minutos de rastreo. Isso devido às questões já mencionadas. As degradações chegaram a 607% e 730%, respectivamente, no intervalo de 60 minutos de rastreo. O resultado menos curado, com maior valor da REQM se deu em RRNA (61 cm) no intervalo de 15 minutos.

Com 30 minutos de rastreo, com a RA, os resultados na região da estação UFPR já apresentam REQM igual a 2 cm, enquanto nas regiões das estações BRAZ e SMAR o REQM apresentou-se igual a 4 cm. Em 45 minutos de rastreo, com

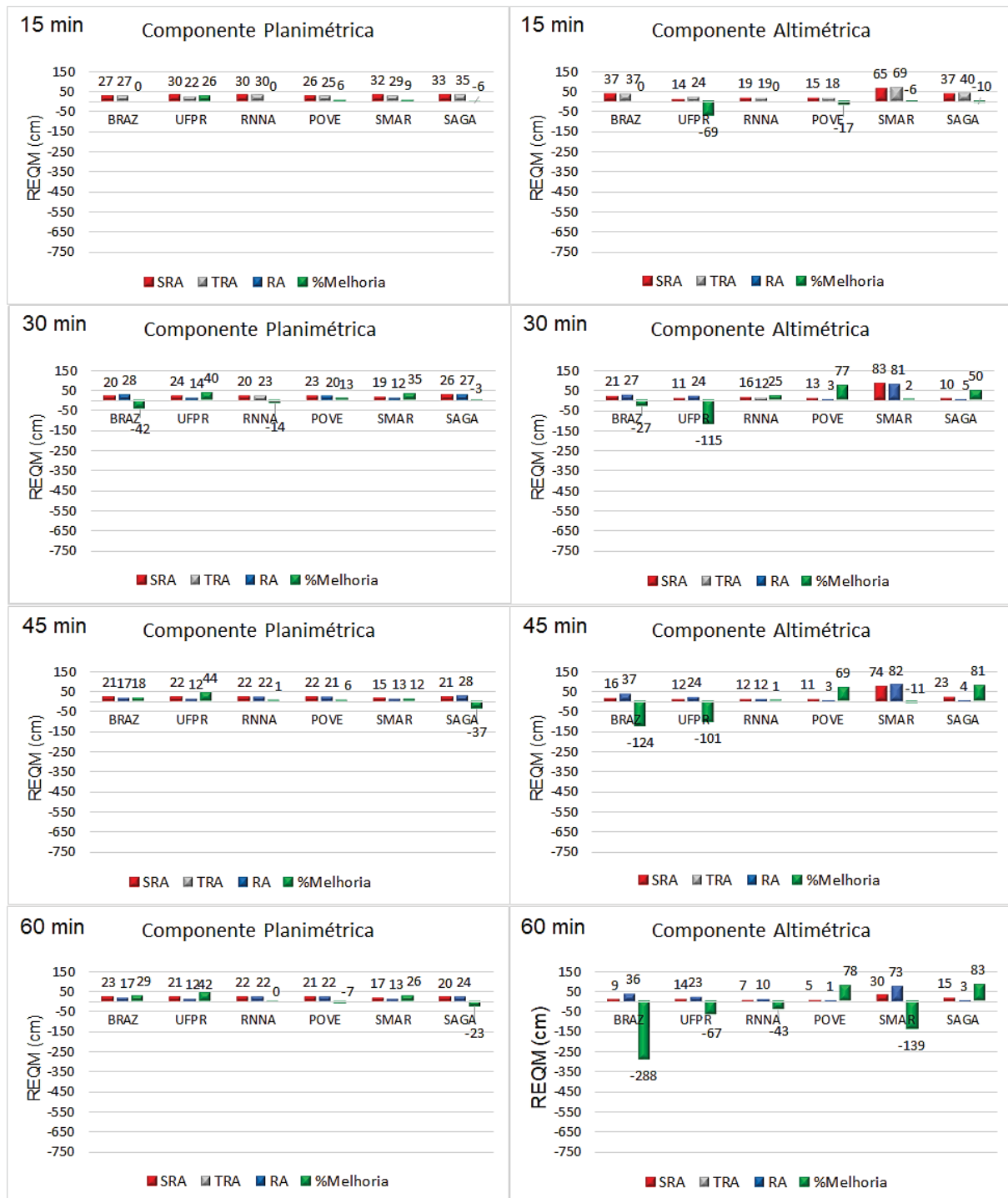
exceção das estações RNNA e POVE, todas as demais estações apresentaram valores da REQM abaixo de 15 cm. Na solução final (60 minutos), o resultado mais acurado ocorreu na região da estação UFPR (REQM igual a 1 cm), a qual possui uma altitude elevada (925,81 m). Com exceção às estações SMAR, RNNA e POVE, nas demais estações foram obtidos valores da REQM abaixo de 10 cm com a RA.

Particularmente para a estação SMAR, é possível notar que os resultados começam a se degradar a partir de 45 minutos de rastreo, o qual apresenta uma piora de 8 cm em relação ao resultado do rastreo de 30 minutos. Com 60 minutos de rastreo a piora aumenta para 10 cm em relação ao resultado do rastreo de 30 minutos. Isso pode estar relacionado com alguma alteração significativa na camada troposférica da região, que não pôde ser modelada devido à resolução temporal dos dados do modelo PNT CPTEC/INPE. As parcelas de erros sistemáticos não modelados podem ter sido absorvidas pelas ambiguidades. Conforme mencionado, nesta região da estação houve a maior variação relativa do valor de ZWD (1,79 cm) em três horas. Adicionalmente, tem-se a questão da baixa altitude (aproximadamente 113 m). Cabe ressaltar que, embora estas questões não tenham afetado os resultados da componente planimétrica, elas podem ter afetado de forma significativa os resultados na componente altimétrica. Isso devido à alta correlação que se tem entre o atraso troposférico e a componente altimétrica do posicionamento, conforme mencionado na seção 2.5.2.3.

Com relação à estação SAGA, conforme mencionado, embora tenha ocorrido uma piora na componente planimétrica, a melhora na componente altimétrica foi de 50% nos intervalos de rastreo de 45 e 60 minutos, a partir da RA (ocorrida aos 36 minutos). Tal contraste não permite que seja indicada uma provável má RA. Mesmo com a configuração de alta umidade, alto valor de ZWD, certa variação do mesmo em três horas e baixa altitude, nesta estação foi verificada a mais efetiva melhora com a RA na componente altimétrica.

Com relação aos resultados para o período do inverno, os mesmos são apresentados no GRÁFICO 7.

GRÁFICO 7 - RESULTADOS OBTIDOS DE ACURÁCIA COM O MODELO DE PNT CPTEC/INPE NO INVERNO



FONTE: A autora (2020).

A partir da observação do GRÁFICO 7, é possível verificar que a RA ocorreu em todas as estações no intervalo de 30 minutos, com exceção de RNNA, que ocorreu no intervalo de 45 minutos. De uma forma geral, os resultados para o período do inverno se apresentaram próximos daqueles obtidos no período de verão

na componente planimétrica. Porém, na componente altimétrica se apresentaram ligeiramente piores. Com relação à questão da altitude, a mesma não influenciou, uma vez que não houve padrão de degradação dos resultados de acurácia para estações com menor altitude. Tal questão pode estar relacionada com a baixa umidade no período de inverno, em relação ao período do verão.

Com relação a componente planimétrica, a RA proporcionou degradação de acurácia apenas nos resultados da estação SAGA, que chegou a 37% no intervalo de 45 minutos. Para as demais estações, com exceção do intervalo de 30 minutos, no qual houve degradação no posicionamento em BRAZ e RNNA, a RA gerou melhorias positivas, alcançando 44% de melhoria na UFPR, no intervalo de 45 minutos. Na solução final, considerando 60 minutos de rastreo, obteve-se o resultado mais acurado, com o valor da REQM sendo igual a 12 cm com a RA na região da estação UFPR. Para todas as demais, o valor da REQM ficou abaixo de 25 cm.

Em particular para os casos das estações BRAZ e UFPR, embora tenham ocorrido melhoras nas componentes planimétricas, as piores significativas (mais de 100%) nas acurácias altimétricas evidenciam uma provável má RA. Estas podendo estar relacionadas à questão mencionada anteriormente. Isto é, a sensibilidade dos resultados às qualidades das modelagens da refração troposférica no processo de RA. Abrindo o contexto, novamente a resolução temporal dos dados pode ter afetado os resultados. Conforme pode ser visto na Tabela 6, em três horas houve um aumento de 0,5 cm na região da estação BRAZ e um decréscimo de aproximadamente o mesmo valor na região da estação UFPR. Durante os intervalos de rastreo podem ter ocorrido mudanças abruptas nas camadas troposféricas, as quais não foram capazes de serem modeladas, gerando assim erros sistemáticos absorvidos pelas ambiguidades, e influenciado assim a qualidade das mesmas.

Para o caso da estação RNNA, os resultados de acurácias planimétricas com a TRA e a RA foram praticamente semelhantes aos resultados dos experimentos SRA. Com relação às acurácias altimétricas, o aumento de 0,25 cm no ZWD (Tabela 6) pode ter ocorrido próximo aos 60 minutos de rastreo, justificando assim o resultado de piora em 43%. Para a estação POVE, a baixa umidade e baixa variação no ZWD em três horas pode ter contribuído para as melhorias de acurácia com as RA, tanto na parte planimétrica quanto na altimétrica. Já na região da estação SMAR, a variação relativamente mais alta do valor de ZWD pode ter

ocorrido após os 30 minutos de rastreio, levando os resultados de acurácia altimétrica a serem degradados rapidamente. De 11% de degradação de acurácia com 45 minutos de rastreio, passou-se a 139% com 60 minutos. Os resultados de acurácia planimétrica não foram influenciados por tal questão, apresentando ligeiras melhoras com a RA.

Com relação ao caso específico da estação SAGA, semelhantemente aos casos dos experimentos no período do verão, embora tenha ocorrido uma piora na componente planimétrica com a RA, a melhora na componente altimétrica foi de 50%, 81% e 83% nos intervalos de rastreio de 30, 45 e 60 minutos, a partir da RA (ocorrida aos 25 minutos). Assim como mencionado anteriormente, tal contraste não permite que seja indicada uma provável má RA. Mesmo com a configuração de alta umidade, valor relativamente alto de ZWD, variação do mesmo em três horas de 1 cm e baixa altitude, nesta estação foi verificada novamente a mais efetiva melhora com a RA na componente altimétrica.

4.3 RESULTADOS OBTIDOS UTILIZANDO-SE A ESTIMATIVA DO ZTD

Com a correção troposférica utilizando-se a estimativa do ZTD no ajustamento foi possível a RA nos períodos de verão e inverno. Os tempos de rastreios gastos para as ocorrências das indicativas de RA são apresentados na TABELA 8.

TABELA 8 - TEMPOS DE RASTREIOS GASTOS PARA AS OCORRÊNCIAS DAS INDICATIVAS DE RA UTILIZANDO-SE A ESTIMATIVA DO ZTD

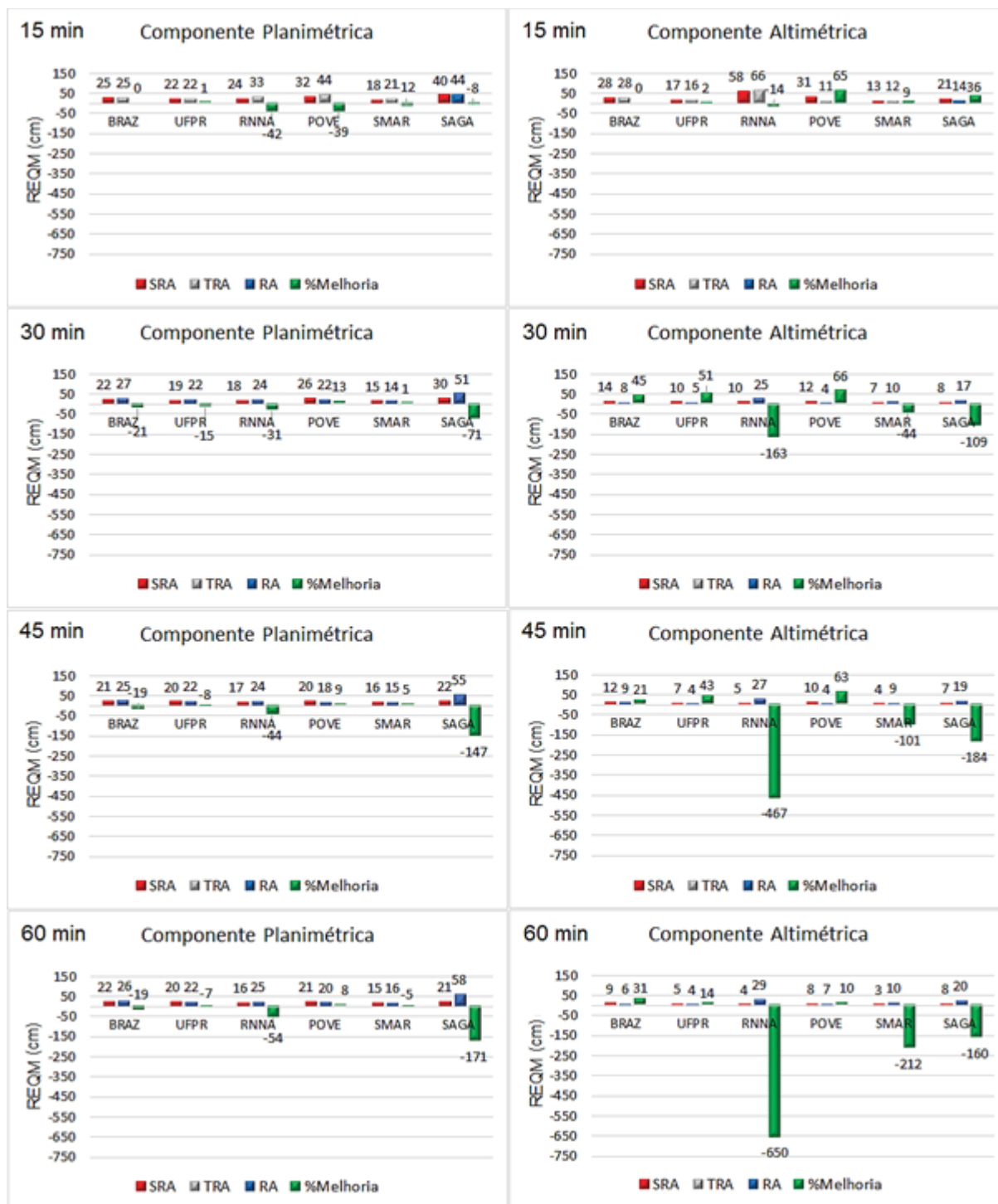
ESTAÇÃO	VERÃO	INVERNO
BRAZ	17 minutos	28 minutos e 15 seg
UFPR	22 minutos	26 minutos e 30 seg
RNNA	17 minutos e 45 seg	36 minutos e 30 seg
POVE	16 minutos e 30 seg	24 minutos e 45 seg
SMAR	16 minutos e 15 seg	9 minutos e 15 seg
SAGA	13 minutos e 45 seg	28 minutos

FONTE: A autora (2020).

Em relação ao modelo de PNT, com exceção da estação RNNA, no período do verão; e das estações BRA e UFPR, no período do inverno, a estimativa do ZTD necessitou de menos tempo para a ocorrência de indicativa de RA. A partir da

TABELA 8 é possível verificar que, no verão, com exceção da estação SMAR, menor tempo foi necessário para alcançar a característica inteira das ambiguidades, aproximadamente 17 minutos, em média. Já no inverno, necessitou-se de cerca de 26 minutos, em média. Desse modo, a fim de obter maior qualidade no posicionamento, recomenda-se rastrear por 30 minutos por segurança. Os resultados em termos de acurácia (REQM) para as componentes planimétrica e altimétrica, para os intervalos de rastreio de 15, 30, 45 e 60 minutos, nos períodos de verão e inverno, são representados nos GRÁFICOS 8 e 9.

GRÁFICO 8 - RESULTADOS OBTIDOS DE ACURÁCIA COM A ESTIMATIVA DO ZTD NO VERÃO



FONTE: A autora (2020).

No que se refere à estimativa do ZTD, com base no GRÁFICO 8 pode-se observar que SAGA atingiu a RA no intervalo de 15 minutos, enquanto que nas demais estações a RA foi alcançada no intervalo de 30 minutos, sendo POVE a única estação na qual a RA proporcionou apenas melhorias positivas. Verifica-se também que, com 30 minutos de rastreo, com exceção de SAGA, os valores da

REQM estavam abaixo de 30 cm (sem e com RA). Com 45 minutos de rastreo, esses valores encontravam-se abaixo de 25 cm, sem e com RA, exceto em SAGA. Na solução final o menor valor da REQM se deu em SMAR.

De forma particular para as estações RNNA, SAGA e SMAR, podem-se indicar prováveis casos de má RA. Na estação SMAR, as evidências de má RA são baseadas nas pioras acentuadas dos resultados de acurácia altimétrica, indo de 44% até 212% com o passar do tempo. Já para os casos das estações RNNA e SAGA, as má RA são evidenciadas não somente pelas pioras acentuadas nas acurácias altimétricas (maiores que 100% a partir de 30 minutos de rastreo), crescentes com o passar do tempo, mas também pelas pioras nas acurácias planimétricas.

Assim como nos experimentos com o modelo de PNT CPTEC/INPE, indica-se aqui como provável causa a maior sensibilidade dos resultados à qualidade da modelagem troposférica quando se busca a RA. Conforme mencionado na seção 2.5.2.3, tem-se o fato de que quando se busca a RA no PPP as convergências dos parâmetros troposféricos não ocorrem de forma imediata, sendo somente alcançadas após as ambiguidades se tornarem inteiras. Assim, segundo Shi e Gao (2013) tem-se a situação comum de que a convergência do parâmetro troposférico exija um tempo de rastreo maior que uma hora. Antes da convergência, a modelagem inadequada do ZTD propõe um erro residual que degrada outros parâmetros como as próprias ambiguidades, podendo levar a uma má RA, e especialmente a coordenada altimétrica pela questão da alta correlação. Uma vez que os tempos de rastreios nos experimentos foram todos abaixo ou iguais a uma hora esta situação pode ter influenciado nos resultados.

Dentre os resultados das estações que não apresentaram má RA, os melhores resultados foram obtidos para a estação POVE, nos quais houve melhorias de acurácia planimétrica. Nas estações BRAZ e UFPR houve ligeiras pioras.

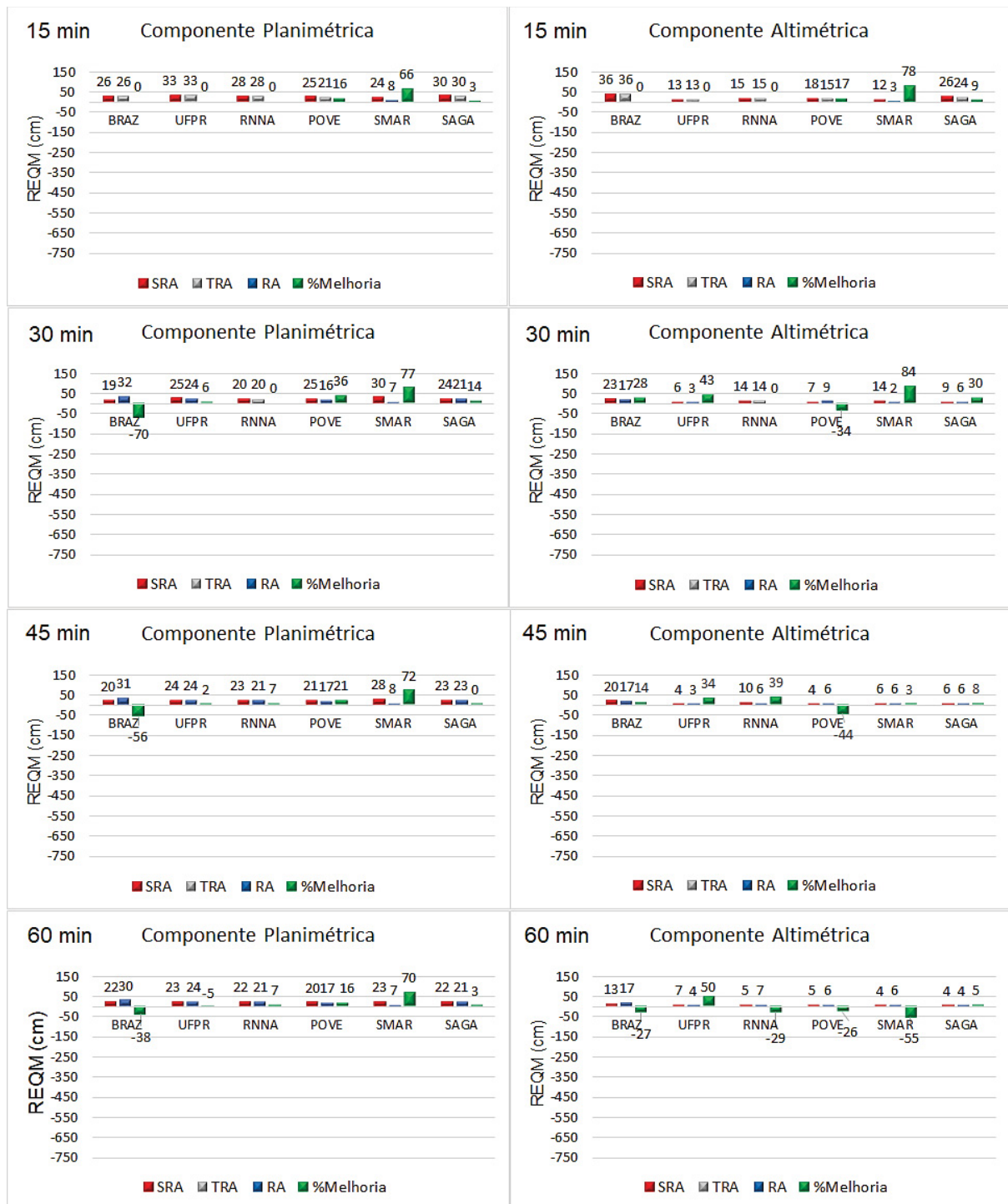
Em relação à componente altimétrica, o comportamento da estimativa do ZTD mostrou-se mais adequado, na qual os valores da REQM foram diminuindo com o tempo de rastreo, sem RA. Todos os valores da REQM encontram-se abaixo de 26 cm no intervalo de 30 minutos, e abaixo de 20 cm no intervalo de 45 minutos, com exceção de RNNA, que apresentou REQM equivalente a 27 cm. Na solução final, os valores da REQM ficaram abaixo de 11 cm, com exceção de RNNA e SAGA.

De forma particular para as estações, conforme mencionado, os prováveis casos de má RA proporcionaram pioras significativas nas acurácias altimétricas dos experimentos das estações RNNA, SAGA e SMAR. Na estação POVE, houve melhorias com a RA de 66%, 63% e 10% para os experimentos de 15, 30 e 60 minutos, respectivamente. Para a estação BRAZ, houve melhoras com a RA de 45%, 21% e 31% para 15, 30 e 60 minutos, respectivamente. Por fim, na estação UFPR as melhoras com a RA foram de 51%, 43% e 14% para 15, 30 e 60 minutos, respectivamente. As diminuições das melhoras com o aumento do tempo de rastreo estão relacionadas com os aumentos das acurácias nos experimentos sem tentativa de RA e as estabilizações das acurácias nos experimentos com RA.

Um ponto importante é que nos casos de má RA não há correlação com as questões de maior ou menor umidade, altitude ou variação de ZWD. Como exemplo pode-se mencionar o caso das estações SMAR e SAGA. Enquanto na primeira houve baixa umidade e variação significativa no ZWD, na segunda estação houve alta umidade e menor variação no ZWD. Outro exemplo é o caso das estações POVE e BRAZ com boa RA. Enquanto na primeira a altitude é menor com variação significativa de ZWD, na segunda a altitude é relativamente maior com menor variação e ZWD.

Com relação aos resultados para o período do inverno, os mesmos são apresentados no GRÁFICO 9.

GRÁFICO 9 - RESULTADOS OBTIDOS DE ACURÁCIA COM A ESTIMATIVA DO ZTD NO INVERNO



FONTE: A autora (2020).

Em relação à componente planimétrica, no GRÁFICO 9 verifica-se que SMAR obteve o posicionamento mais acurado, com menores valores da REQM nos intervalos de tempo analisados. Nessa estação a RA gerou melhorias de 66% a 77%. Os resultados menos acurados foram na região da estação UFPR no intervalo de 15 minutos, e em BRAZ nos demais intervalos de tempo de rastreo. Na solução

final, BRAZ apresentou degradação de 38% com a RA. Assim como no período do verão, os resultados no inverno também não apresentaram um padrão exato de correlação com umidade, variação de ZWD e altitude.

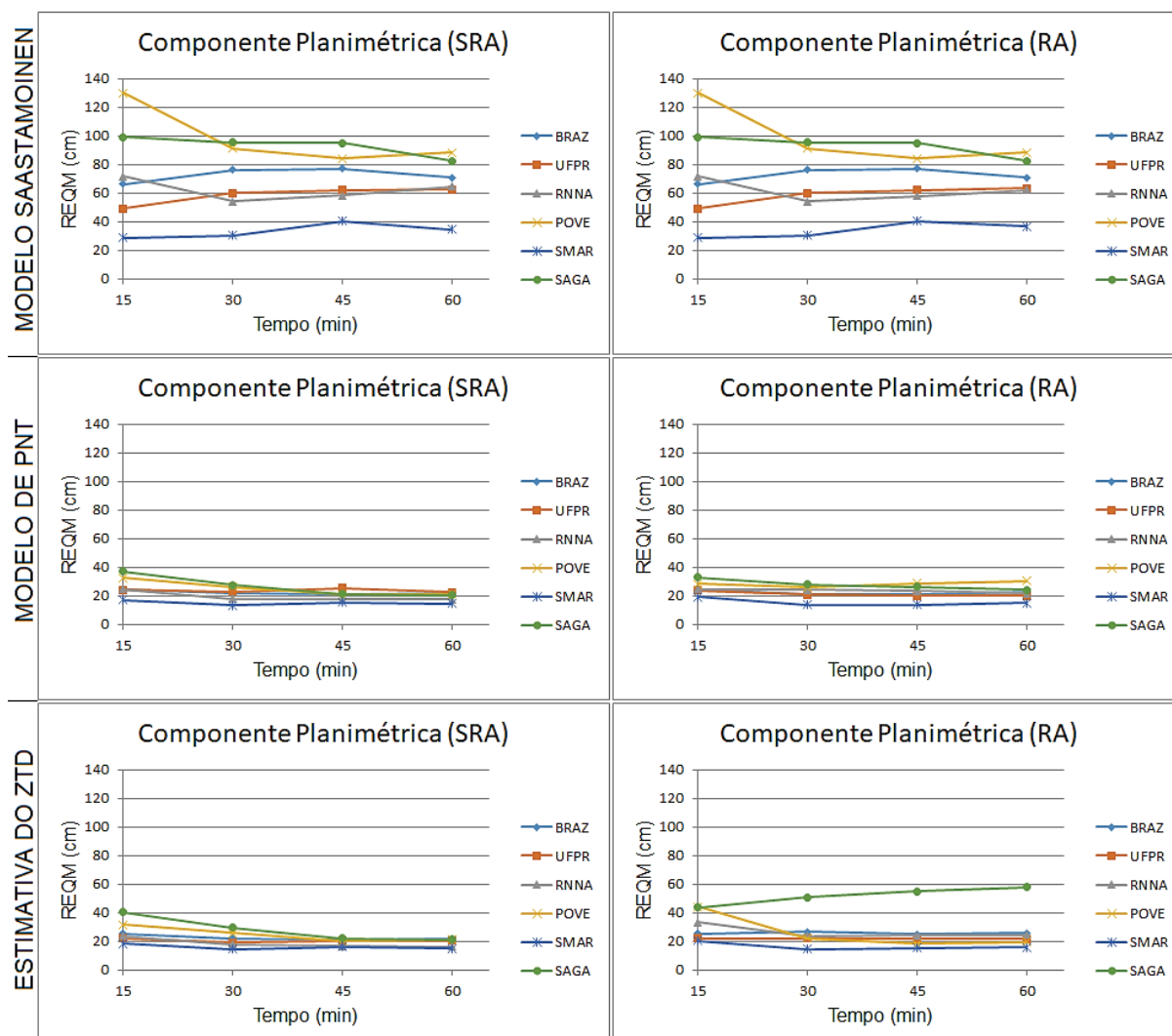
Na componente altimétrica, os valores da REQM encontravam-se abaixo de 40 cm nos 15 minutos iniciais de rastreo. Com exceção de BRAZ, esses valores são menores que 15 cm, em 30 minutos de rastreo, menores do que 11 cm com 45 minutos de rastreo, e menores que 8 cm com 60 minutos de rastreo.

Pode-se constatar que na componente altimétrica a estimativa do ZTD possibilitou resultados mais acurados e consistentes, com menores valores da REQM do que na componente planimétrica. Os menores valores da REQM foram na região da estação UFPR e em SAGA. Na solução final, com a RA, todas as estações apresentaram posicionamento mais acurado no período do inverno em relação ao verão, com exceção de BRAZ. Cabe ressaltar também que não houve nenhum caso de má RA como nos experimentos do período de verão. Estes dois fatos indicam certa dificuldade de gerar estimativas consistentes de ZTD em situações de maior umidade. Por fim, as piores nos experimentos com RA de 60 minutos estão relacionadas com as estabilizações das acurácias nestes e os aumentos das acurácias nos experimentos sem tentativa de RA.

4.4 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Nos GRÁFICOS 10, 11, 12 e 13 são apresentados os comportamentos dos valores da REQM com o tempo para as componentes planimétrica e altimétrica, sem e com a tentativa de RA, para cada uma das correções troposféricas analisadas. Nos gráficos, a sigla SRA indica a não tentativa de RA, e RA indica que a opção de RA foi habilitada no processamento, permitindo a tentativa da mesma. Vale ressaltar que as RA ocorreram de acordo com o que foi exibido nas TABELAS 7 e 8.

GRÁFICO 10 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DA REQM COMPONTE PLANIMÉTRICA (VERÃO)



FONTE: A autora (2020).

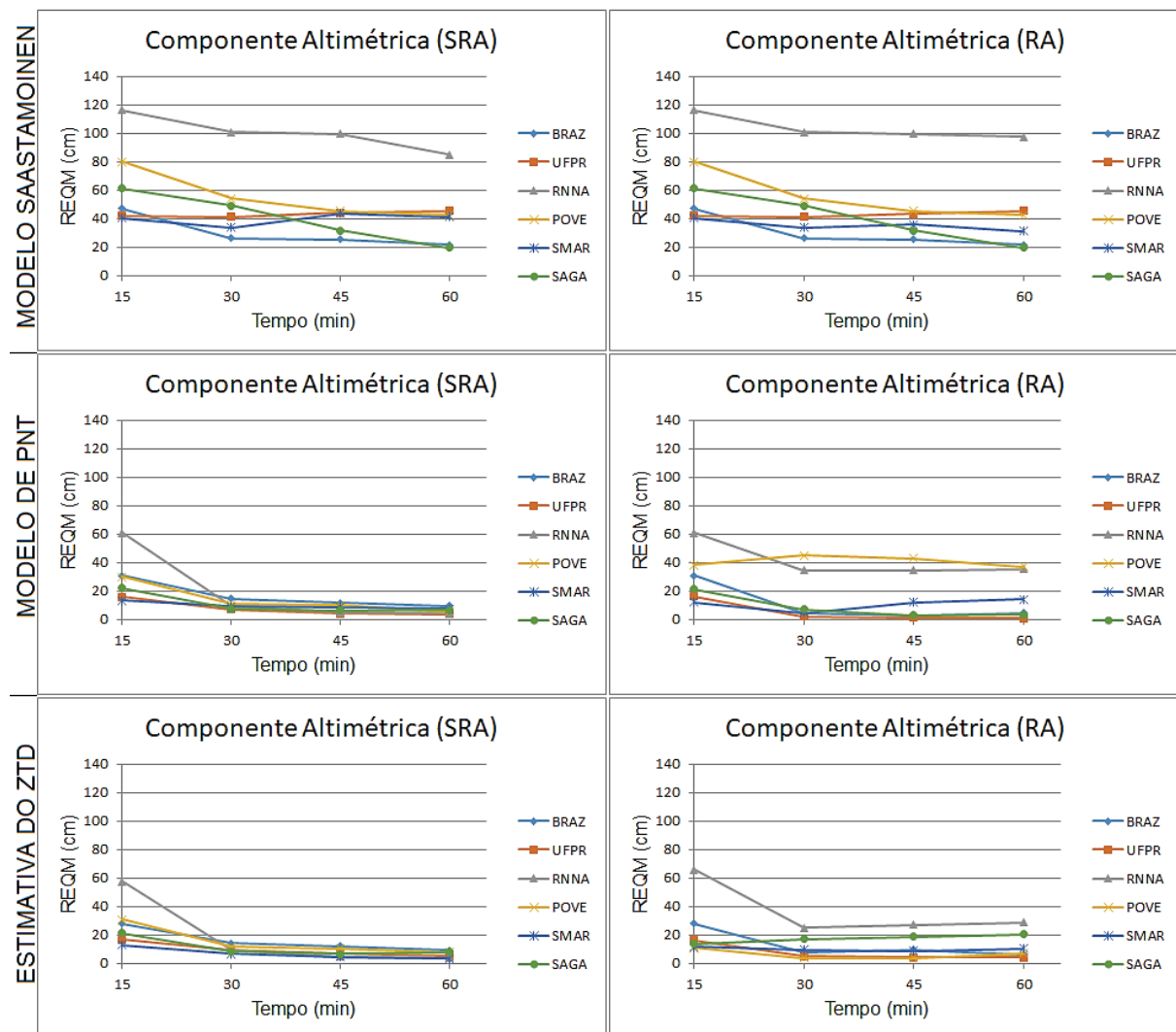
Em relação às correções troposféricas utilizadas, pode-se verificar no GRÁFICO 10 que SRA o modelo Saastamoinen apresentou os resultados mais discrepantes, menos acurados, em relação aos resultados obtidos quando utilizados o modelo de PNT CPTEC/INPE e a Estimativa de ZTD. A aplicação do modelo de PNT CPTEC/INPE gerou resultados da REQM consistentes, com valores convergindo para 20 cm com o aumento do tempo de rastreo. Já a estimativa do ZTD proporcionou o posicionamento mais acurado que os modelos, após 45 minutos de rastreo.

Com a tentativa de RA o modelo Saastamoinem apresentou mais uma vez os maiores valores da REQM, sendo o menos adequado. O modelo de PNT CPTEC/INPE proporcionou resultados abaixo de 40 cm, com acurácia na ordem de

20 cm para as estações ao longo do tempo de rastreo. A estimativa do ZTD não foi adequada para a correção troposférica na região da estação SAGA, porém apresentou acurácia em torno de 20 cm para as demais estações.

No GRÁFICO 11 são apresentados os comportamentos dos valores para a componente altimétrica no período do verão.

GRÁFICO 11 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DA REQM COMPONTE ALTIMÉTRICA (VERÃO)

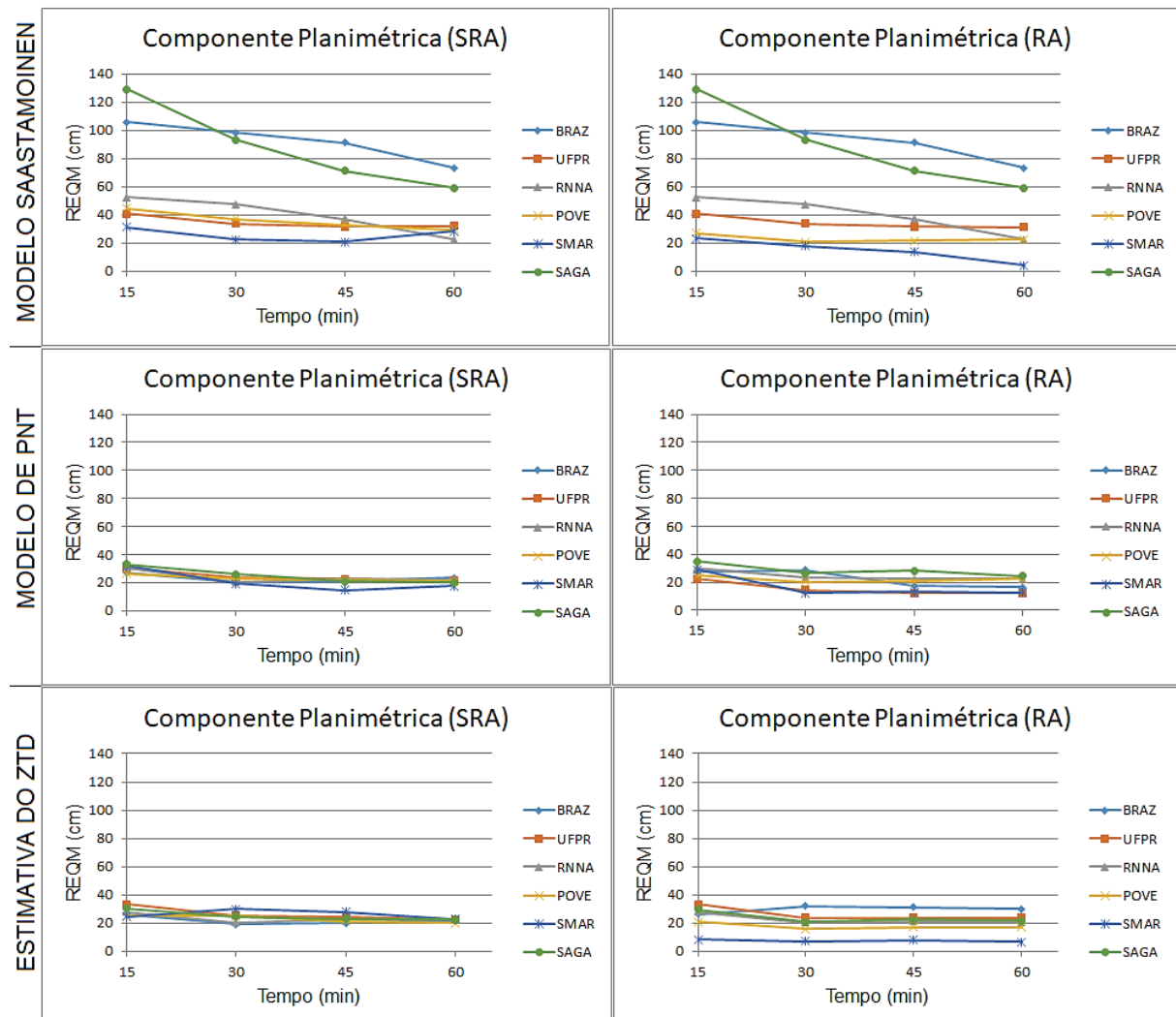


FONTE: A autora (2020).

Em relação à componente altimétrica, a partir da análise do GRÁFICO 11 pode-se constatar que o modelo Saastamoinen foi o menos acurado na determinação do atraso troposférico SRA e com a tentativa de RA, com valores da REQM acima de 20 cm no intervalo final de 60 minutos de rastreo. A aplicação do

modelo de PNT CPTEC/INPE e a estimativa do ZTD proporcionaram valores da REQM próximos aos casos SRA. Com exceção de SMAR e POVE, o modelo de PNT CPTEC/INPE proporcionou posicionamento mais acurado que a estimativa do ZTD com a tentativa de RA.

GRÁFICO 12 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DA REQM COMPONTE PLANIMÉTRICA (INVERNO)

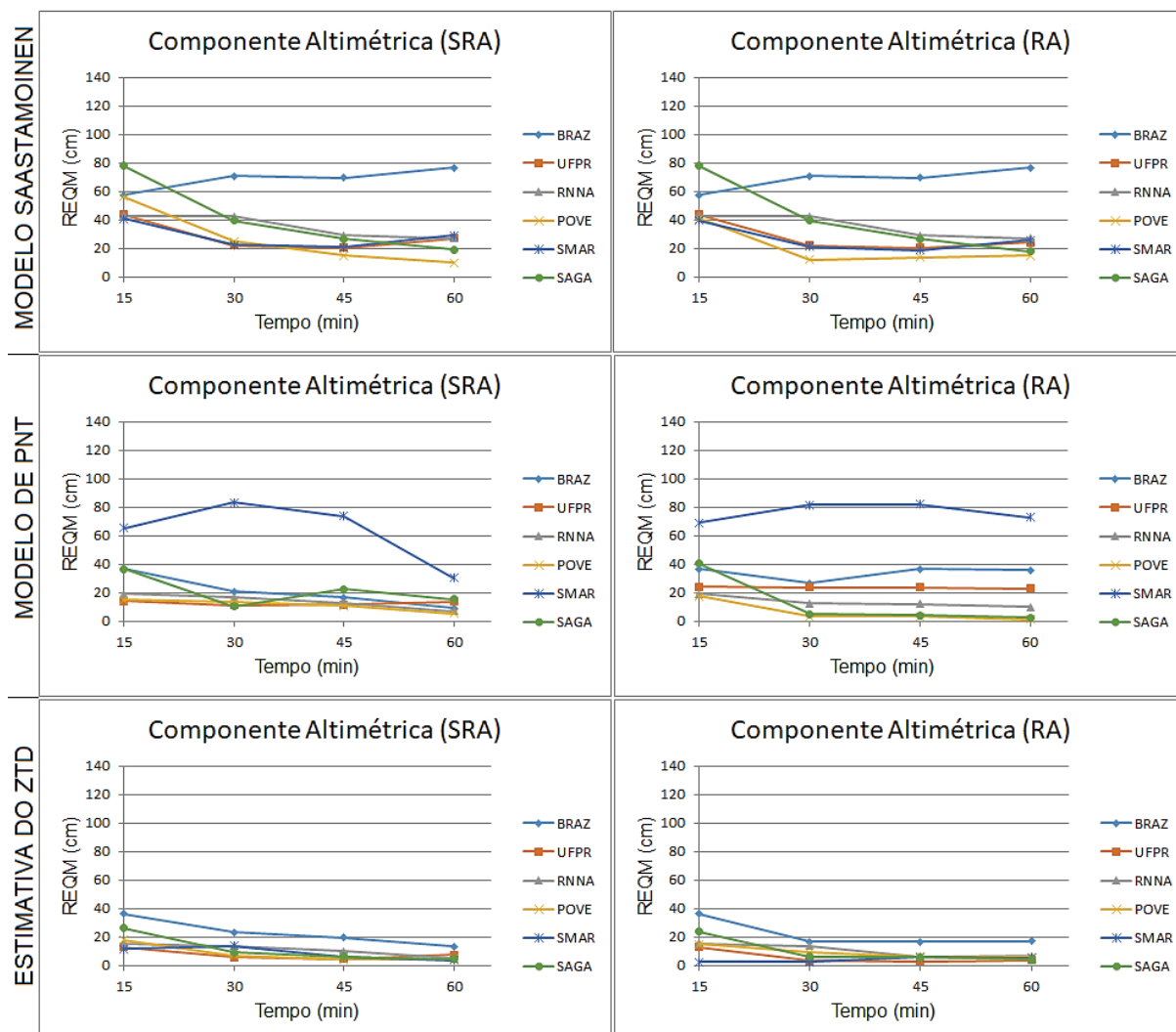


FONTE: A autora (2020).

No que diz respeito ao período de inverno (GRÁFICO 12), de um modo geral, os resultados na componente planimétrica foram mais discrepantes utilizando o modelo Saastamoinen SRA e com a tentativa de RA. A aplicação do modelo de PNT CPTEC/INPE proporcionou resultados ligeiramente mais acurados que a estimativa de ZTD SRA durante os intervalos de tempo analisados, no entanto, a estimativa do ZTD foi mais acurada na solução final, com 60 minutos de tempo de

rastreio. Com a tentativa de RA o modelo de PNT CPTEC/INPE foi mais acurado que a estimativa de ZTD para a estação BRAZ, e menos acurado que a estimativa do ZTD para a estação SMAR. Para as demais estações ambos, PNT CPTEC/INPE e estimativa de ZTD geraram valores da REQM aproximados.

GRÁFICO 13 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DA REQM COMPONTE ALTIMÉTRICA (INVERNO)



FONTE: A autora (2020).

Por fim, para a componente altimétrica, com base no GRÁFICO 13 pode-se observar que a estimativa do ZTD proporcionou resultados mais acurados que os modelos Saastamoinen e PNT CPTEC/INPE, SRA e com a tentativa de RA. Em seguida os menores valores da REQM foram obtidos utilizando-se o modelo de PNT CPTEC/INPE. O modelo Saastamoinen foi o que proporcionou os resultados menos acurados SRA e com a tentativa de RA.

Para melhor exemplificar o desempenho das diferentes modelagens troposféricas utilizadas, a TABELA 9 indica quantitativamente as porcentagens de melhoria entre essas correções troposféricas.

TABELA 9 - PORCENTAGEM DE MELHORIA ENTRE AS MODELAGENS TROPOSFÉRICAS ANALISADAS

	VERÃO				INVERNO			
	% Melhoria 2D		% Melhoria Alt		% Melhoria 2D		% Melhoria Alt	
	SRA	RA	SRA	RA	SRA	RA	SRA	RA
PNT SAAS	68,31	66,93	74,71	61,98	55,83	55,64	37,32	23,60
ZTD PNT	1,22	-21,91	1,11	22,38	-3,65	2,18	50,68	63,50
ZTD SAAS	68,70	59,68	74,99	70,49	54,22	56,60	69,08	72,12

FONTE: A autora (2020).

Na TABELA 9, a expressão “PNT SAAS” equivale à porcentagem de melhoria do modelo de PNT em relação ao modelo Saastamoinen; “ZTD PNT” é a porcentagem de melhoria da estimativa do ZTD comparada ao modelo de PNT; e por fim, “ZTD SAAS” corresponde à porcentagem de melhoria da estimativa do ZTD em relação ao modelo Saastamoinen.

Com base nos valores da TABELA 9 é possível constatar que o modelo Saastamoinen foi o menos adequado para modelar os efeitos da refração troposférica no território brasileiro, principalmente no período do verão, com um erro de 74% na componente altimétrica e 68% na componente planimétrica, SRA, comparado aos demais. Isso indica a falta de adequabilidade desse modelo em representar as características climáticas específicas do Brasil, principalmente devido à grande umidade dessa região, a qual não corresponde aos parâmetros utilizados na elaboração desse modelo.

O modelo de PNT CPTEC/INPE conseguiu modelar de forma mais adequada a grande umidade no período do verão, sendo 21,91% mais acurado que a estimativa do ZTD com a RA, na componente planimétrica. No período do inverno, foi ligeiramente mais acurado (3,65%) do que a estimativa do ZTD SRA nessa componente. Nos casos SRA no período do verão e com tentativa de RA no período do inverno a estimativa do ZTD foi ligeiramente mais adequada que o modelo de PNT CPTEC/INPE (1,22% e 2,18%, respectivamente), na componente planimétrica.

Já na componente altimétrica, a estimativa do ZTD forneceu resultados mais acurados do que os modelos Saastamoinen e PNT CPTEC/INPE, chegando a

74,99% mais acurada que o modelo Saastamoinen na componente altimétrica SRA no verão, e 63,50% mais acurada que o modelo de PNT CPTEC/INPE com RA no período do inverno.

A respeito dos resultados dos experimentos nos quais houve possíveis casos de má RA, apresentando significativa degradação nas acurácias altimétricas, é possível também fazer um comparativo. Uma vez que com o uso do modelo de Saastamoinen não houve RA em nenhum experimento, apenas os experimentos com uso do modelo de PNT CPTEC/INPE e da estimativa do ZTD podem ser comparados.

No caso da aplicação do modelo de PNT CPTEC/INPE, no período do verão, os possíveis casos de má RA ocorreram para as estações RNNA e POVE. No mesmo período, utilizando-se a estimativa do ZTD, os casos de possíveis má RA ocorreram para as estações RNNA, SMAR e SAGA. Por outro lado, para a estação POVE houve efetiva melhora com a RA ao se utilizar a estimativa de ZTD, assim como na estação SAGA ao se utilizar o modelo de PNT CPTEC/INPE.

Para o período de inverno, com o uso do modelo de PNT CPTEC/INPE possíveis casos de má RA ocorreram nas estações BRAZ e UFPR. Enquanto isso, no mesmo período, com a estimativa do ZTD nenhum caso de provável má RA ocorreu. Ainda com a estimativa de ZTD, para as estações BRAZ e UFPR houve melhora com a RA.

As divergências mencionadas, tanto nas acurácias quanto nos casos de possíveis má RA, indicam uma clara influência do tipo de modelagem de refração troposférica sobre a qualidade e confiabilidade da RA.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 CONCLUSÕES

Nessa pesquisa foi avaliado o impacto de diferentes tipos de correção troposférica na RA do PPP, em seis estações no território brasileiro com características climáticas e troposféricas distintas. Foram realizados experimentos nas estações RBMC BRAZ, UFPR, RNNA, POVE, SMAR e SAGA, com diferentes intervalos de tempo de rastreo, nos períodos de verão e inverno. Para a correção troposférica, utilizou-se o modelo Saastamoinen e a estimativa de ZTD, disponíveis

no software RTKLIB v. 2.4.2, além do modelo de PNT CPTEC/INPE em conjunto com a função de mapeamento de Niell, os quais foram adicionados ao código-fonte desse mesmo software em linguagem C.

Os dados foram processados, com cada diferente correção troposférica, com e sem a tentativa de RA, e analisados em termos de acurácia a partir da REQM das componentes planimétrica e altimétrica, tendo como referência as coordenadas oficiais das próprias estações GNSS RBMC.

De acordo com os resultados obtidos, observando-se as diferenças de resultados nos experimentos, tanto com o uso de um mesmo modelo quanto com o uso de diferentes modelos, conclui-se que há uma significativa e clara influência do tipo de modelagem da refração troposférica na qualidade do PPP com RA. Inclusive verificando-se casos extremos de má RA com significativa degradação de acurácia altimétrica. Nas análises, foi verificado que, de um modo geral, as melhorias mais significativas com as modelagens troposféricas utilizadas, ocorreram na componente altimétrica das estações analisadas. Pode-se verificar também que, na maioria dos experimentos, no período do verão os resultados ficaram menos acurados do que no período do inverno, o que era esperado devido a maior umidade que o verão apresenta em relação ao inverno, nas camadas troposféricas.

Considerando ou não a RA, das três correções troposféricas analisadas, a utilização da estimativa do ZTD e do modelo de PNT CPTEC/INPE possibilitaram um posicionamento mais acurado do que o modelo Saastamoinen, o qual não possibilitou a RA em nenhum dos experimentos, apresentando, em alguns casos, valores da REQM equivalentes ao dobro dos valores obtidos nos demais modelos analisados. Enquanto a utilização do modelo de Saastamoinen proporcionou acurácia decimétrica, a estimativa de ZTD e a aplicação do modelo de PNT CPTEC/INPE proporcionaram acurácias na ordem do centímetro. Além disso, nos casos em que a RA ocorreu de forma adequada, levou-se menos tempo para alcançar maior acurácia em relação à solução com ambiguidades reais.

Verifica-se também que o modelo de PNT CPTEC/INPE apresentou resultados mais acurados que a estimativa de ZTD, no período do verão com RA e no período do inverno SRA, na componente planimétrica. No entanto, nos demais casos analisados a estimativa do ZTD forneceu resultados mais acurados do que os modelos Saastamoinen e PNT CPTEC/INPE. No caso do modelo Saastamoinen já era esperado, pois o mesmo foi elaborado com parâmetros climáticos que não

representam as condições reais da troposfera do território brasileiro. Já no caso do modelo de PNT CPTEC/INPE, isso pode ter ocorrido devido à resolução espacial de 15 km e temporal de 3 horas dos valores de ZHD e ZWD disponibilizados pelo Eta15km, uma vez que em 15 km e em três horas as características da troposfera podem mudar significativamente, e esse fato não está sendo considerado na interpolação, sendo necessário um modelo com maior resolução espacial e temporal. Tal questão é indicada, por exemplo, em Ahn (2016).

Em certos experimentos, a RA degradou a qualidade do posicionamento. Dentro deste conjunto de experimentos, alguns apresentaram degradações maiores que 100% nas acurácias altimétricas, nos quais são indicados casos de prováveis má RA. De uma forma geral, isso pode estar relacionado ao fato de que quando se tem o processo de RA, os resultados tornam-se mais sensíveis às qualidades das modelagens dos erros sistemáticos. No caso da troposfera, passa a haver uma forte dependência de uma boa resposta local. Erros remanescentes provenientes das modelagens inadequadas são absorvidos pelas componentes altimétricas e pelas ambiguidades, podendo levar as mesmas a inteiros incorretos (má RA). Com o injuncionamento das ambiguidades nas demais épocas do ajustamento sequencial, o erro do inteiro incorreto pode vir a ser propagado, degradando a qualidade dos resultados de forma crescente.

Neste contexto, com o uso do modelo de PNT CPTEC/INPE, os casos de má RA podem ter ocorrido por conta da não adequabilidade das resoluções temporal e espacial do modelo, conforme mencionado. Além disso, foram verificadas correlações com certas variáveis, como umidade na camada troposférica, variação no ZWD e altitude. Já no caso do uso da estimativa do ZTD, não foram verificadas correlações com as variáveis mencionadas. Neste caso, a questão dos tempos de rastreios dos experimentos, menores ou iguais a uma hora, podem não ter sido suficientes para as convergências dos parâmetros troposféricos. Tal questão pode também ter gerado erros residuais nas modelagens troposféricas, os quais podem ter sido absorvidos pelas ambiguidades e pelas componentes altimétricas, degradando a qualidade de ambas. Uma alternativa para este último caso é a utilização da metodologia proposta por Shi e Gao (2013), onde há a aplicação de dados externos precisos da troposfera na modelagem e os erros remanescentes são injuncionados de forma relativa com um pequeno desvio padrão.

Diante das análises apresentadas, pode-se concluir que a estimativa do ZTD presente no software RTKLIB v. 2.4.2 é adequada para proporcionar posicionamento com acurácia na ordem do centímetro, em diferentes regiões do território brasileiro. No entanto, como mencionado, casos de má RA podem ocorrer, principalmente no período do verão, com a presença de maior umidade nas camadas troposféricas. Isso em decorrência das questões apresentadas. Desta forma, se há a demanda por um posicionamento mais acurado e confiável, é importante ter cautela no uso da RA com esta modelagem troposférica, considerando rastreios de mais de uma hora de duração, almejando a convergência do parâmetro troposférico no ajustamento sequencial.

Na questão da modelagem troposférica a partir de dados de modelos de PNT regionais juntamente com a RA no PPP pode prover resultados promissores, por considerar as reais características da região de estudo. Vale ressaltar que, com uma maior resolução espacial e temporal do modelo de PNT melhores resultados podem ser obtidos, pois, desta forma, os dados interpolados do modelo representarão as características da atmosfera da região com maior veracidade.

Por fim, tem-se que, quanto mais eficiente e próxima da realidade for a modelagem troposférica, mais eficiente se torna a minimização de seu efeito sobre o sinal GNSS e sobre a RA, uma vez que menos resíduos estarão presentes no ajustamento, o que viabiliza uma RA com mais confiabilidade e consequentemente um posicionamento de maior qualidade. Assim, algumas recomendações são sugeridas a seguir.

5.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Investigar e analisar melhorias nas rotinas adicionadas no RTKLIB v. 2.4.2 do modelo de PNT CPTEC/INPE em conjunto com a função de mapeamento de Niell;
- Realizar o processamento com o ZTD calculado a partir dos dados do novo modelo de PNT CPTEC/INPE (WRF), o qual possui uma resolução espacial de 5 km e temporal de 1 hora, o que pode melhorar significativamente a qualidade do posicionamento devido aos valores mais acurados de ZHD e ZWD;

- Utilizar uma função de mapeamento mais regional, como a BMF (GOUVEIA, 2019), a qual pode gerar melhores resultados por ser baseada em dados de PNT mais representativos e característicos do território brasileiro;
- Investigar a utilização de diferentes valores para o teste ratio, a fim de verificar se as ambiguidades são resolvidas de forma mais adequada, e analisar a taxa de RA;
- Investigar a utilização da estimativa de ZTD, implementando no RTKLIB a metodologia proposta por Shi e Gao (2013), podendo utilizar como dados de entrada os dados do modelo de PNT CPTEC/NPE.

REFERÊNCIAS

- ALBARICI, F. L.; GUIMARÃES, G. DO N.; TRABANCO, J. L. A.; SANTOS, M. Modelagem dos Efeitos Geodinâmicos que afetam as Medições Maregráficas e GNSS. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 71, n. 1, p. 75-98, 2019.
- ALVES, C. M. D. **Solução de ambiguidades GPS no Posicionamento por Ponto Preciso utilizando uma rede de estações**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, 2010. 163p.
- ALVES, C. M. D.; MONICO, J. F. G.; ROMÃO, V. M. C. Análise da acurácia no PPP a partir da solução de ambiguidades GPS em curtos períodos de ocupação. **Revista Brasileira de Cartografia**, Nº 63/5, p. 585-600, 2011.
- ALVES, D. B. M.; SAPUCCI, L. F.; MARQUES, H. A.; SOUZA, E. M.; GOUVEIA, T. A. F.; Magário, J. A. Using a regional numerical weather prediction model for GNSS positioning over Brazil. **GPSSolut**. P. 677–685, 2015.
- BOEHM, J.; SCHUH, H. **Vienna Mapping Functions in VLBI Analyses**. Geophys. Res. Lett. 2004. 31, L01603, doi:10.1029/2003GL018984.
- BLEWITT, G (1989). Carrier phase ambiguity resolution for the global positioning system applied to geodetic baselines up to 2000 km. **Journal of geophysical research**. v. 94. n. b8. p. 10.187 - 10.203. 1989.
- BLEWITT, G. (2006). **The Fixed Point Theorem of Ambiguity Resolution For Precise Point Positioning of GPS Networks: Theory And Applications**, Eos Trans. AGU, 87(52), Fall Meet. Suppl., Abstract G43A-0977.
- BRAGA, F. L. S.; DAL POZ, W. R. Potencialidades do PPP no Software Bernese com Compatibilizações de Sistemas Geodésicos de Referência e de Tempo. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 71, n. 3, p. 726-755, 2019.
- CAMARGO, P. O. **Modelo Regional da Ionosfera Para Uso em Receptores de Uma Frequência**. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1999. 191p.
- CARARO, A. C. **Correções Relativísticas Sobre as Medidas de Tempo GPS**. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006. 100p.
- CARARO, A. C. et al. Correções relativísticas sobre as medidas de tempo GPS. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 16, n. 1, p. 156-176, 2010.
- CHAVES, J. C. **Uso da tecnologia GPS na monitoração de deformação: sistemas, etapas e experimentos**. Tese (Doutorado em Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2001. 114p.

COLLINS, P. Isolating and estimating undifferenced GPS integer ambiguities. In: **Proceedings of the ION National Technical Meeting**, San Diego, CA, USA. p. 720–732. 2008.

COLLINS, P.; BISNATH, S. Undifferenced GPS Ambiguity Resolution using the Decoupled Clock Model and Ambiguity Datum Fixing. **Journal of the Institute of Navigation**, v.57. 2008.

CPTEC. **INPE**. Centro de Previsões de Tempo e Estudos Climáticos & Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Disponível em: <<http://www.cptec.inpe.br>>. Acesso em: maio de 2019.

DACH R.; LUTZ S.; WALSER P.; FRIDEZ P. **Bernese GNSS Software Version 5.2**. User manual, Astronomical Institute, University of Bern, Bern Open Publishing. doi:10.7892/boris.72297. ISBN: 978-3-906813-05-9.

DAL POZ, W. R. **Investigações Preliminares Sobre a Influência do Clima Espacial no Posicionamento Relativo com GNSS**. 2010. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2010. 159p.

DAVIS, J. L., HERRING, T. A., SHAPIRO I., ROGERS, A. E. & ELGENED, G. **Geodesy by Interferometry: Effects of Atmospheric Modeling Errors on Estimates of Base Line Length**. Radio Sci., 1985, vol. 20,1593-1607.

DE ABREU, P. A. G.; ALVES, D. B. M.; GOUVEIA, T. A. F. Aplicação e Avaliação do Modelo de Previsão Numérica do Tempo ETA15km no Posicionamento Absoluto. **Revista Brasileira de Cartografia**, Nº 66/3, p. 555- 567, 2014.

DE OLIVEIRA, A. F. **Análise Comparativa de Diferentes Modelos Troposféricos para RTK em Rede Usando o Conceito de Estação de Referência Virtual**. Dissertação de Mestrado em Ciências Geodésicas. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013. 177p.

DE OLIVEIRA JR. P. S. **Definition and implementation of a new service for precise GNSS positioning**. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2017. 252p.

DE OLIVEIRA JUNIOR, P. S.; MONICO, J. F. G.; SAPUCCI, L. F. Influência da Estimativa do Gradiente Horizontal Troposférico na Qualidade do Posicionamento GNSS de Alta Acurácia. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 69, n. 2, 2016.

DREWES H. AND SÁNCHEZ L. The varying surface kinematics in Latin America: VEMOS 2009, 2015, and 2017, **Symposium SIRGAS2017**. Mendoza, Argentina. November 28, 2017.

EBNER, R.; FEATHERSTONE, W. E. How well can online GPS PPP post-processing services be used to establish geodetic survey control networks? **Journal of Applied Geodesy**, v. 2, n. 3, p. 149-157, 2008.

EURIQUES, J. F. **Determinação da umidade do solo por meio da técnica de refletometria GNSS: primeiros resultados no Brasil**. Dissertação de Mestrado em Ciências Geodésicas. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2019. 112p.

FARRET, J. C. **O Efeito do Multicaminho Estático nas Medidas da Fase das Portadoras GPS**. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2000. 153p.

FREIBERGER JUNIOR, J. **Investigações da Calibração Relativa de Antenas GNSS**. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007. 203p.

Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – **IBGE**. 2017.

FUND, F. et al. **Assessment of Integer Precise Point Positioning performances**. European Geophysical Union, Vienna, Austria. 2012.

GE, M.; GENDT, G.; ROTHACHER, M.; SHI, C.; LIU, J. Resolution of GPS carrier-phase ambiguities in precise point positioning (PPP) with daily observations. **Journal of Geodesy**, v.82. n. 7. p.389–399. 2008.

GENG, J.; SHI, C. Rapid initialization of real-time PPP by resolving undifferenced GPS and GLONASS ambiguities simultaneously. **Journal of Geodesy**. DOI 10.1007/s00190-016-0969-7. 2016.

GENG, J.; MENG, X.; DODSON, A. H.; TEFERLE, F. N. Integer ambiguity resolution in precise point positioning: method comparison. **Journal of Geodesy**, v. 84, n. 9, p. 569-581, 6 ago 2010a.

GENG, J.; MENG, X.; TEFERLE, F.; DODSON, A. Performance of Precise Point Positioning with Ambiguity Resolution for 1- to 4-hour observation periods. **Survey Review**, v.42, p.155-165. 2010b.

GENG, J.; TEFERLE, F.; SHI, C.; MENG, X.; DODSON, A.; LIU, J. **Ambiguity resolution in precise point positioning with hourly data**. GPS solutions. 2009.

GEORGIADOU, Y; KLEUSBERG, A. On carrier signal multipath effects in relative GPS positioning. **Manuscripta geodaetica**, v. 13, n. 3, p. 172-179, 1988.

GOUVEIA, T. A. F. **Função de Mapeamento Brasileira da Atmosfera Neutra e Sua Aplicação no Posicionamento GNSS na América do Sul**. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2019. 129p.

GOUVEIA, T. A. F. **Modelagem neutrosférica sobre a América do Sul baseada em PNT e assimilação de dados locais e robusta avaliação utilizando observações GNSS**. Dissertação de Mestrado em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2013. 136 p.

GOUVEIA, T. A. F.; ALVES, D. B. M.; SAPUCCI, L. F. Avaliação da Acurácia e Tempo de Convergência do PPP Com o Uso de Previsão Numérica de Tempo na Modelagem do Atraso Troposférico. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 69, n. 3, 2017.

GPS. **New Civil Signals**. 2019b. Disponível em: <<http://www.gps.gov/systems/gps/modernization/civilsignals/>>. Acesso em: Março de 2020.

HADAS, T. *et al.*, Optimum stochastic modeling for GNSS tropospheric delay estimation in real-time. **GPS Solutions**, v. 21, n. 3, p. 1069-1081, 2017.

HEGARTY, C.; POWERS, E. D.; FONVILLE, B. **Accounting for Timing Biases Between GPS, Modernized GPS, and Galileo Signals**. Naval Observatory Washington DC, 2005.

HERRING, T. A. Modeling atmospheric delays in the analysis of space geodetic data. **Proceedings of Refraction of Transatmospheric signals in Geodesy**, eds. JC De Munck and TA Spoelstra, Netherlands Geodetic Commission Publications on Geodesy, v. 36, n. 4, 1992.

HIEU, L. V.; FERREIRA, V. G.; HE, X.; TANG, X. Study on Cycle-Slip Detection And Repair Methods For a Single Dual-Frequency Global Positioning System (GPS) receiver. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 20, n. 4, p. 984-1004, 2014.

HOPFIELD, H. S. Two-quartic tropospheric refractivity profile for correcting satellite data. **Journal of Geophysical Research**, Vol. 74, No. 18, pp. 4487–4499, 1969.

HOFMANN-WELLENHOF, B. LICHTENEGGER, H. WASLE, E. **GNSS: Global Navigation Satellite Systems**. Springer Wien New York: 2008.

HUINCA, S. C. M. **Análise de Influências Ambientais na Calibração de Antenas de Receptores GPS**. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014. 212p.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Manual do Usuário Aplicativo Online IBGE-PPP Versão: abril 2017. Rio de Janeiro, RJ: Ministério do Planejamento, Desenvolvimento e Gestão; 2017. Acesso em junho de 2019. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101677.pdf>>.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Manual do Usuário Aplicativo Online IBGE-PPP. Rio de Janeiro, RJ: Ministério do Planejamento, Desenvolvimento e Gestão; 2015.

INSTITUTO NACIONAL DE COLONIZAÇÃO E REFORMA AGRÁRIA - INCRA. **Manual Técnico de Posicionamento**. Brasília, 2013. 1ª Edição.

INTERNATIONAL GNSS SERVICE (IGS). **Real Time Service (RTS)**. Disponível em: <<http://www.igs.org/rtts>> Acesso: 11 agosto 2016(b).

KRUEGER, C. P. **Investigações sobre aplicações de alta precisão do GPS no âmbito marinho**. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) - Setor de Tecnologia, CPGCG, UFPR. Curitiba, 1996. 288p.

KOUBA, J., HÉROUX, P., Precise Point Positioning Using IGS Orbit and Clock Products. **GPS Solutions**, v. 5, n. 2, pp 12 - 28, 2001.

LANDSKRON, D.; BÖHM, J. VMF3/GPT3: Refined Discrete And Empirical Troposphere Mapping Functions. **Journal of geodesy**, v. 92, n. 4, p. 349-360, 2018.

LAURICHESSE, D. **The CNES Real-time PPP with undifferenced integer ambiguity resolution demonstrator**. In: ION GNSS 2011, Portland. Anais... Portland, 2011.

LAURICHESSE, D. MERCIER, F. Integer ambiguity resolution on undifferenced GPS phase measurements and its application to PPP. In: **ION GNSS 20th Int. Technical Meeting of the Satellite Division**, Fort Worth TX, p. 25–28. 2007.

LAURICHESSE, D.; MERCIER, F.; BERTHIAS, J. P. Real time zero-difference ambiguities fixing and absolute RTK. In: **ION NTM**, 2008. San Diego, California, 2008.

LAURICHESSE, D. MERCIER, F. BERTHIAS, J. P. BROCA, P. CERRI, L. Integer ambiguity resolution on undifferenced GPS phase measurements and its application to PPP and satellite precise orbit determination. **Navigation**, v. 56. p. 135–149. 2009.

LEICK, A. GPS SATELLITE SURVEYING, 3rd Edition, 2004, 464 p.

LI, X.; ZHANG, X.; GE, X. Regional reference network augmented precise point positioning for instantaneous ambiguity resolution. **Journal of Geodesy**. v. 85, n. 3. p. 151–158. 2011.

LI, Y. LI, B. GAO, Y. **Improved PPP Ambiguity Resolution Considering the Stochastic Characteristics of Atmospheric Corrections from Regional Networks**. Sensors. v. 2015. n. 15. p. 29893 - 29909. 2015.

LIMA, C. M. D. A.; MONICO, J. F. G.; e ROMÃO, V. M. C. Análise da acurácia no PPP a partir da solução de ambiguidades GPS em curtos períodos de ocupação. **Revista Brasileira de Cartografia**. 2011.

LIMA, C. M. D. A. **Posicionamento por ponto preciso com solução de ambiguidades inteiras no contexto de rede GPS**. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2015.

LIMA, C. M. D. A.; MONICO, J. F. G.; MARQUES, H. A. PPP com solução inteira das ambiguidades da fase da onda portadora: Fundamentos e Resultados. RBC. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 68, p. 1063-1077, 2016.

LYARD, F.; LEFEVRE, F.; LETELLIER, T; FRANCIS, O. Modelling The Global Ocean Tides: Modern Insights From FES2004, **Ocean Dynamics**, 56, 394–415. 2006. doi:10.1007/s10236-006-0086-x.

MARINI, J. W. Correction of satellite tracking data for an arbitrary tropospheric profile. **Radio Science**, Vol. 7, No. 2, pp. 223–231, 1972. DOI:10.1029/RS007i002p00223.

MARQUES, H. A.; MONICO, J. F. G.; MARQUES, H. A. S.; AQUINO, M. análise dos efeitos ionosféricos de ordem superior no ciclo solar 24 e influência no posicionamento GNSS absoluto. **Boletim de Ciências Geodésicas**, 20(4), 879-901, 2014. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.1590/S1982-21702014000400049>.

MATSUOKA, M. T.; CAMARGO, P. O. Cálculo do TEC usando dados de receptores GPS de dupla frequência para produção de mapa da ionosfera para região brasileira. **Revista Brasileira de Cartografia**, Presidente Prudente, v. 56, n. 01, p. 14-27, 2004.

MARQUES, H. A. M. **PPP em Tempo Real com Estimativa das Correções dos Relógios dos Satélites no Contexto de Rede GNSS**. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) - Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente. 2012. 228p.

McCARTHY, D.D.; PETIT, G. **IERS Conventions (2003)**. IERS Technical Note 32, IERS Convention Center, Frankfurt. 2004. 127p.

MIKHAIL, E.; ACKERMAN, F. **Observations and Least Squares**. University Press of America, 1976. 497 p.

MONICO, J. F. G. Posicionamento pelo GNSS: Descrição, fundamentos e aplicações. São Paulo: **Editora UNESP**, 2008. 476 p.

MONICO, J. F. G. Posicionamento Por Satélite: Situação Atual e Perspectivas Para o Início do Terceiro Milênio. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 6, n. 1, 2018.

MOREIRA, D. M. **Geodésia Aplicada ao Monitoramento Hidrológico da Bacia Amazônica**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2016. 255p.

MORESCKI JUNIOR, L. F. M. **Determinação dos Parâmetros PCOs E PCVs de Antenas GNSS Utilizando Propagação Numérica**. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015. 135p.

NIELL, A. E. Global Mapping Functions for the Atmosphere Delay at Radio Wavelengths. **Journal of Geophysical Research**, Vol. 101, No.B2, Pages 3227-3246, 1996.

NIELL, A. E. **Preliminary evaluation of atmospheric mapping functions based on numerical weather models**. Phys. Chem. Earth, v. 26, p.475-480, 2001.

NIEVINSKI F.G. **Ray-tracing options to mitigate the neutral atmosphere delay in GPS**. Dissertação (MSc). University of New Brunswick. Canada, 2009. 230p.

PACIONE R.; VESPE F.; PACE B. Near Real-Time GPS Zenith Total Delay validation at E-GVAP Super Sites. **Bollettino Di Geodesia E Scienze Affini** 1. 2009.

PAN, L.; GUO, F. Real-time tropospheric delay retrieval with GPS, GLONASS, Galileo and BDS data. **Scientific Reports**, v. 8, n. 1, p. 1-17, 2018.

PEREIRA, V. A. S.; CAMARGO, P. DE O.; TACHIBANA, V. M. Análise Multivariada Aplicada no Estudo Dos Efeitos da Ionosfera, Troposfera e Multicaminho Nos Sinais GNSS. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 68, n. 3, 2016.

PEREZ, J. A. S.; MONICO, J. F. G.; CHAVES, J. C. Velocity Field Estimation Using GPS Precise Point Positioning: The South American Plate Case. **Journal of Global Positioning Systems**. Vol. 2, No. 2, p. 90-99. 2003.

PETIT, G; LUZUM, B. IERS (2010): **IERS Conventions**, (eds.), IERS Technical Note n. 36, 179 pp., 2010.

PILAPANTA AMAGUA, C. G. **Avaliação do impacto do efeito de carga por pressão atmosférica em posicionamento GPS de alta precisão nas regiões do Equador continental e da Amazônia brasileira**. Dissertação de Mestrado em Ciências Geodésicas. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2018. 171p.

ROTHACHER, M. Estimation of station heights with GPS. In: **Vertical reference systems**. Springer, Berlin, Heidelberg, 2002. p. 81-90.

RTKLIB ver. 2.4.2 Manual. Disponível em: http://www.rtklib.com/prog/manual_2.4.2.pdf. 2013. Acessado em: novembro de 2018.

SAASTAMOINEN, J. Contribution to the Theory of Atmospheric Refraction. **Bulletin Geodésique**, Vol. 105, Sept 1972, Vol. 106, Dec 1972, Vol. 107, March, 1973.

SANTOS, A. F. dos; Silva, R. P. da; Tavares, T. O.; Ormond, A. T. S.; Rosalen, D. L.; Assis, L. C. de. Parallelism Error in Peanut Sowing Operation With Auto-Steer Guidance. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.21, p.731-736, 2017. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v21n10p731-736>.

SAPUCCI, L. F. **Estimativa do Vapor d'água Atmosférico e a Avaliação do Atraso Zenital Troposférico Utilizando GPS**. Dissertação de Mestrado em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2001. 193p.

SAPUCCI, L. F. **Previsões do Atraso Zenital Troposférico para a América do Sul: Variabilidade Sazonal e Avaliação da Qualidade**. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2005. 167p.

SAPUCCI, L. F.; MACHADO, L. A. T; MONICO, J. F. Galera. Previsões do Atraso Zenital Troposférico para a América do Sul: Variabilidade Sazonal e Avaliação da Qualidade. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 58, p. 279-292, 2006.

SEEBER, G. **Satellite Geodesy: Foundations, Methods, and Applications**. Berlin, New York: Walter de Gruyter, 2003.

SHEN, X. (2002). **Improving Ambiguity Convergence in Carrier Phase-based Precise Point Positioning**. MSc Thesis, Calgary: University of Calgary, 2002.

SHI, J. **Precise Point Positioning Integer Ambiguity Resolution with Decoupled Clocks**. PhD thesis, University of Calgary. 2012.

Shi, J. and Gao, Y. (2012). Improvement of PPP-inferred tropospheric estimates by integer ambiguity resolution. **Advances in Space Research**, 50(10), 1374–1382.

SHI, J.; E GAO. Y. A Troposphere Constraint Method to Improve PPP Ambiguity-Resolved Height Solution. **Journal of Navigation** 67 (02): 249–262. 2013.

SHI, J; GAO Y. **A comparison of three PPP integer ambiguity resolution methods**. **GPS Solutions**. v. 18. n. 4. p. 519 - 528. 2014.

SPILKER Jr JJ. Tropospheric Effects on GPS. In: PARKINSON BW & SPILKER Jr JJ (Ed.). Global Positioning System: Theory and Applications. **American Institute of Aeronautics and Astronautics**, 1996. p. 517-546.

SKAMAROCK, W. C.; KLEMP, J. B.; DUDHI, J.; et al. A Description of the Advanced Research WRF Version 3. Boulder, Colorado, **USA: National Center for Atmospheric Research**, 2008. (NCAR/TN-475+STR).

TEUNISSEN, P. J. G; MONTENBRUCK, O. Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems. Springer Handbooks. DOI: 10.1007/978-3-319-42928-1%202017.

TEUNISSEN, P.J.G.; ODIJK, D.; ZHANG, B. PPP-RTK: Results of CORS network-based PPP with integer ambiguity resolution. **Journal of Aeronautics, Astronautics and Aviation, Series A**. v.42. n.4. p. 223–230. 2010.

WANG, M. **Ambiguity resolution with precise point positioning**. Calgary: University of Calgary. 2014.

WELLS, D., N. BECK, D. DELIKARAOGLU, A. KLEUSBERG, E. KRAKIWISKY, G. LACHAPPELLE, R. B. LANGLEY, M. NAKIBOGLU, K. SCHWARZ, H. TRANQUILLA & P. VANICEK. **Guide to GPS Positioning**, Canadian GPS Associates, Fredericton, NB, Canada. 1986.

WÜBBENA, G.; SCHMITZ, M.; BAGGE, A. PPP-RTK: Precise Point Positioning using state-space representation in RTK networks. **18th International Technical Meeting**, ION GNSS-05, Long Beach, California., September 13-16, 2005.

YI, W. SONG, W. LOU, Y. SHI, C. YAO, Y. **A method of undifferenced ambiguity resolution for GPS+GLONASS precise point positioning**. Scientific Reports. v. 6. p. 26334. 2016.

ZUMBERGE, J. F.; HEFLIN, M. B.; JEFFERSON, D. C.; WATKINS, M. M.; WEBB, F. H. Precise Point Positioning for the Efficient and Robust Analysis of GPS data from Large Networks. **Journal of Geophys Research**, v.102(B3), doi:10.1029/96JB03.